

DIÁLOGOS INTERDISCIPLINARES EM ENGENHARIA

VOLUME 1

2026

ORGANIZADORES

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Ronaldo de Jesus Barros

Lilian Barros Santiago

José Átila Matos Aroucha Júnior

Thiago Santana de Oliveira

Wellington Santos Araújo



Organizadores

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Ronaldo de Jesus Barros

Lilian Barros Santiago

José Átila Matos Aroucha Júnior

Thiago Santana de Oliveira

Wellington Santos Araújo

DIÁLOGOS INTERDISCIPLINARES EM ENGENHARIA

Volume 1

1ª EDIÇÃO



SÃO LUÍS - 2026



EDITORA NOVUS

SÃO LUÍS - MA - 2026



WWW.EDITORANOVUS.COM.BR



EDITORANOVUS@GMAIL.COM

Diagramação e Edição

Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte

Eduardo Mendonça Pinheiro

Normalização

José Marcelino Nascimento Veiga Júnior

Conteudista

Autores © 2026

Organizadores

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Ronaldo de Jesus Barros

Lilian Barros Santiago

José Átila Matos Aroucha Júnior

Thiago Santana de Oliveira

Wellington Santos Araújo

© 2026 Copyright – Direitos reservados. A Editora Novus é detentora dos direitos autorais relativos à edição, diagramação e ao projeto gráfico da presente obra. Os autores permanecem titulares dos direitos autorais de seus respectivos textos. Esta publicação está licenciada sob a Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), permitindo a reprodução, o download e o compartilhamento total ou parcial do conteúdo, desde que a fonte seja devidamente citada, com atribuição obrigatória de autoria, e que a obra seja disponibilizada exclusivamente em Acesso Aberto (Open Access). Não é permitida qualquer forma de alteração, adaptação ou modificação do conteúdo, bem como sua disponibilização em plataformas de acesso restrito ou com finalidade comercial.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D536

Diálogos interdisciplinares em engenharia. / organizadores: Mirian Nunes de Carvalho Nunes [et al.]. – São Luís: Editora Novus, 2026.

205 f.: il. color. v.1.

Publicação digital (e-book) no formato PDF

ISBN: 978-65-84364-42-4

DOI: 10.29327/5879189

1. Engenharia interdisciplinar. 2. Inovação tecnológica. 3. Sustentabilidade. 4. Manutenção industrial. 5. Desenvolvimento tecnológico. I. Nunes, Mirian Nunes de Carvalho. II. Barros, Ronaldo de Jesus. III. Santiago, Lilian Barros. IV. Aroucha Júnior, José Átila Matos. V. Oliveira, Thiago Santana de. VI. Araújo, Wellington Santos. VII. Título.

CDU: 62

Elaborado por José Marcelino Nascimento Veiga Júnior – CRB 13/320

CONSELHO EDITORIAL

Dr^a Anali Linhares Lima
M.Sc. Alan Jefferson Lima de Moraes
Dr. André Leonardo Demaison Medeiros Maia
Dr^a Anna Christina Sanazario de Oliveira
Dr^a Aurea Maria Barbosa de Sousa
Dr^a Camila Pinheiro Nobre
Dr. Claudio Alves Benassi
Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
Dr^a Claudiene Diniz da Silva
Dr. Diogo Guagliardo Neves
M.Sc. Eduardo Oliveira Pereira
Dr^a Elba Pereira Chaves
Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior
M.Sc. Érica Mendonça Pinheiro
Dr. Fabio Antonio da Silva Arruda
M.Sc. Fernanda Tabita Barroso Zeidan
Dr. George Alberto da Silva Dias
Dr^a Gerbeli de Mattos Salgado Mochel
Dr^a Giselle Cutrim de Oliveira Santos
Dr^a Herlane de Olinda Vieira Barros
Dr^a Ivete Furtado Ribeiro Caldas
M.Sc. José Carlos Durans Pinheiro
M.Sc. Josiney Farias de Araújo

M.Sc. Julianno Pizzano Ayoub
Dr. Leonardo França da Silva
M.Sc. Lucianna Serfaty de Holanda
Dr^a Luciara Bilhalva Corrêa
Dr^a Luana Martins Cantanhede
Dr^a Maria Raimunda Chagas Silva
Dr^a Marina Bezerra Figueiredo
Dr^a Michela Costa Batista
Dr. Moisés dos Santos Rocha
Dr^a Priscila Xavier de Araújo
M.Sc. Ramaiany Carneiro Mesquita
Dr^a Rita de Cássia Silva de Oliveira
M.Sc. Rosany Maria Cunha Aranha
Dr. Saulo José Figueiredo Mendes
Dr^a Samantha Ariadne Alves de Freitas
Dr^a Sandra Imaculada Moreira Neto
M.Sc. Shirley Ribeiro Carvalho
Dr^a Sinara de Fátima Freire dos Santos
M.Sc. Tatiana Mendes Bacellar
Dr^a Thais Roseli Corrêa
Dr^a Thalita Karolline de Queiroz Pereira
M.Sc. Victor Crespo de Oliveira
Dr. Wellinton de Assunção
Dr. William de Jesus Ericeira Mochel Filho

Acesse www.editoranovus.com.br/corpo-editorial-2/ para conhecer os membros do Corpo Editorial

Parecer editorial e avaliação por pares

Os trabalhos que integram esta obra foram submetidos à apreciação do Conselho Editorial da Editora Novus e avaliados por pareceristas externos, por meio do sistema de revisão por pares (peer review), tendo sido considerados aptos para publicação.

Nota editorial: Trata-se de uma produção de caráter independente, na qual os direitos autorais permanecem sob a titularidade de seus respectivos autores. Eventualmente, alguns textos podem apresentar desdobramentos de pesquisas, comunicações ou trabalhos acadêmicos previamente apresentados ou defendidos, cabendo aos autores a observância rigorosa das boas práticas acadêmicas, especialmente no que se refere à prevenção do autoplágio. O conteúdo das obras é de responsabilidade exclusiva dos autores, não refletindo, necessariamente, o posicionamento da Editora Novus, dos organizadores, dos revisores ou dos membros do Conselho Editorial.

PREFÁCIO

A engenharia contemporânea encontra-se diante de desafios cada vez mais complexos, exigindo soluções que ultrapassem os limites das especialidades tradicionais e promovam a integração entre diferentes áreas do conhecimento. É nesse contexto que a obra *Diálogos Interdisciplinares em Engenharia – Volume 1* se apresenta como uma contribuição relevante para o fortalecimento da produção científica, técnica e acadêmica, reunindo estudos que refletem a diversidade temática e a amplitude de aplicações da engenharia na sociedade atual.

Os capítulos que compõem esta coletânea abordam temas estratégicos relacionados à engenharia elétrica, mecânica, civil, gestão industrial, logística, manutenção, qualidade, sustentabilidade, usinagem, energia, infraestrutura e inovação tecnológica. Ao longo da obra, os autores promovem reflexões fundamentadas em revisões de literatura, análises técnicas e discussões aplicadas, evidenciando a importância da pesquisa como instrumento para o desenvolvimento científico e para a solução de problemas reais enfrentados pelos diversos setores produtivos.

Entre os assuntos discutidos, destacam-se os sistemas de proteção em instalações elétricas, a aplicação de ferramentas de inteligência de negócios na logística, a gestão da manutenção industrial, os desafios da construção civil sustentável, o reaproveitamento de resíduos, a influência dos processos de usinagem na produtividade industrial, os sistemas híbridos de geração de energia e as perspectivas associadas à Indústria 4.0 e à Indústria 5.0. Essa pluralidade de abordagens demonstra o caráter interdisciplinar da engenharia e sua capacidade de dialogar com diferentes campos do saber em busca de soluções inovadoras e sustentáveis.

Mais do que apresentar resultados e discussões técnicas, esta obra evidencia a relevância da formação contínua e da produção científica como pilares para o avanço tecnológico e para a qualificação profissional. Os capítulos revelam o compromisso de seus autores com a disseminação do conhecimento, contribuindo para aproximar a academia, o setor produtivo e a sociedade.

Assim, *Diálogos Interdisciplinares em Engenharia* constitui uma leitura valiosa para estudantes, pesquisadores, docentes, profissionais e gestores que buscam compreender as transformações contemporâneas da engenharia e suas múltiplas interfaces. Que os textos aqui reunidos inspirem novas pesquisas, promovam o intercâmbio de ideias e fortaleçam o desenvolvimento de soluções cada vez mais eficientes, inovadoras e socialmente responsáveis.

Boa leitura!

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 10 **ANÁLISE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO SEGUNDO A NBR 5410**

Jose Wilson Costa Damascena Junior

Lilian Barros Santiago

Paulo José Pinto Souza

 **10.29327/5879189.1-1**

CAPÍTULO 2 23 **A IMPORTÂNCIA DO POWER BI NA GESTÃO DE TERMINAIS LOGÍSTICOS DE GRANÉIS SÓLIDOS E LÍQUIDOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Caio Eduardo Almeida de Lima

Antônio Merval Machado Tavares

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

 **10.29327/5879189.1-2**

CAPÍTULO 3 31 **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO NA CONSTRUÇÃO**

Ilsonmar De Aguiar Costa

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

José Atila Matos Aroucha Júnior

 **10.29327/5879189.1-3**

CAPÍTULO 4 43 **MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL: FUNDAMENTOS E ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO**

Julienne Sousa Falcao Melo

Ronaldo de Jesus Barros

 **10.29327/5879189.1-4**

CAPÍTULO 5 53 **GESTÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Idaylis Placida Lindoso

Ronaldo de Jesus Barros

 **10.29327/5879189.1-5**

CAPÍTULO 6..... 66

GESTÃO EFICIENTE DA MANUTENÇÃO: O PAPEL DA TPM NA INDÚSTRIA 4.0

Marcia Tamara Fontes Silva

Ronaldo de Jesus Barros

 **10.29327/5879189.1-6**

CAPÍTULO 7..... 76

SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA APLICADOS À MINERAÇÃO: INTEGRAÇÃO COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ARMAZENAMENTO EM BATERIAS

Antonio de Jesus Licar Pires Junior

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Lilian Barros Santiago

 **10.29327/5879189.1-7**

CAPÍTULO 8 86

A USINAGEM COMO FATOR ESTRATÉGICO NOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO INDUSTRIAL

Benedito Wesley Serrão Alves

Thiago Santana de Oliveira

 **10.29327/5879189.1-8**

CAPÍTULO 9..... 97

ANÁLISE DO USO DE CONCRETO USINADO EM OBRAS RESIDENCIAIS

Gabriel Da Silva Santos

José Helio Oliveira Santos Sobrinho

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

 **10.29327/5879189.1-9**

CAPÍTULO 10..... 108

SEGURANÇA E ECONOMIA DE CUSTO EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Matheus Dutra Gomes Da Silva

Lilian Barros Santiago

 **10.29327/5879189.1-10**

CAPÍTULO 11..... 121

INFILTRAÇÃO EM LAJES DE COBERTURA: BREVE COMENTÁRIO SOBRE ANOMALIAS E PREVENÇÃO

José Francisco Gomes da Silva

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

José Átila Matos Aroucha Júnior

 **10.29327/5879189.1-11**

CAPÍTULO 12131
A GESTÃO DA QUALIDADE COMO INSTRUMENTO DE MELHORIA DE PROCESSOS E INOVAÇÃO NAS ORGANIZAÇÕES

Leonardo Alves Mariano Junior

Ramaiany Carneiro Mesquita

 **10.29327/5879189.1-12**

CAPÍTULO 13 141
GESTÃO DA MANUTENÇÃO: O PAPEL DO PCM NA PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL

Ronald Gabriel Pereira Costa

Antônio Merval Machado Tavares

 **10.29327/5879189.1-13**

CAPÍTULO 14.....151
GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Adriana Monteiro Ribeiro

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

 **10.29327/5879189.1-14**

CAPÍTULO 15161
INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE USINAGEM NO ACABAMENTO SUPERFICIAL: ÊNFASE A AÇOS CARBONO PROCESSADOS POR TORNEAMENTO

José Cleuton Pereira da Silva

Ronaldo de Jesus Barros

 **10.29327/5879189.1-15**

CAPÍTULO 16171
ANÁLISE DO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS NA EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM

Eduardo Nunes Macedo

Thiago Santana de Oliveira

 **10.29327/5879189.1-16**

CAPÍTULO 17182
ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA A INDÚSTRIA 5.0

Edmilson Lopes De Sousa Neto

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

 **10.29327/5879189.1-17**

CAPÍTULO 18 188
INTEGRIDADE DE FIBRAS ÓPTICAS E SUA INFLUÊNCIA NA CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS

Marcos Vinicius Oliveira de Carvalho

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Lilian Barros Santiago

 **10.29327/5879189.1-18**



Capítulo 1

ANÁLISE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO SEGUNDO A NBR 5410

**ANALYSIS OF PROTECTION SYSTEMS IN LOW-VOLTAGE ELECTRICAL INSTALLATIONS
ACCORDING TO ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5410**

Jose Wilson Costa Damascena Junior¹

Lilian Barros Santiago²

Paulo José Pinto Souza³

¹ Engenharia Elétrica, Faculdade de Anhanguera, São Luís-Maranhão

² Docente, Engenharia Elétrica, Faculdade de Anhanguera, São Luís-Maranhão

³ Engenharia Controle e Automação, Faculdade de Anhanguera, São Luís-Maranhão

Resumo

O presente trabalho analisa os sistemas de proteção em instalações elétricas de baixa tensão à luz da norma ABNT NBR 5410, destacando sua importância para a segurança, confiabilidade e eficiência dos sistemas elétricos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica qualitativa e descritiva, com base em artigos, normas técnicas e literatura especializada publicados nos últimos dez anos. Foram abordados os principais dispositivos de proteção, como disjuntores termomagnéticos, dispositivos diferenciais residuais (DR) e dispositivos de proteção contra surtos (DPS), enfatizando seus princípios de funcionamento, aplicações e relevância no contexto das instalações modernas. Os resultados evidenciam que o correto dimensionamento dos condutores e a adequada especificação dos dispositivos de proteção são fatores determinantes para a prevenção de falhas elétricas, sobrecargas e curtos-circuitos. Além disso, o estudo destaca a importância dos sistemas de aterramento, conforme os esquemas TN, TT e IT, como medida essencial para garantir a segurança dos usuários e a integridade dos equipamentos. Conclui-se que a aplicação rigorosa das diretrizes da NBR 5410 contribui significativamente para a redução de riscos elétricos, reforçando a necessidade de projetos bem elaborados, manutenção adequada e conformidade com as normas técnicas vigentes.

Palavras-chave: Instalações elétricas; Proteção elétrica; Baixa tensão; NBR 5410.

Abstract

This study analyzes protection systems in low-voltage electrical installations in accordance with the ABNT NBR 5410 standard, highlighting their importance for the safety, reliability, and efficiency of electrical systems. The research was developed through a qualitative and descriptive bibliographic review based on articles, technical standards, and specialized literature published over the last ten years. The main protection devices were addressed, including thermal-magnetic circuit breakers, residual current devices (RCDs), and surge protection devices (SPDs), emphasizing their operating principles, applications, and relevance in the context of modern electrical installations. The results demonstrate that the correct sizing of conductors and the proper specification of protection devices are determining factors in preventing electrical failures, overloads, and short circuits. Furthermore, the study highlights the importance of grounding systems, according to the TN, TT, and IT schemes, as an essential measure to ensure user safety and equipment integrity. It is concluded that the rigorous application of the guidelines established by NBR 5410 significantly contributes to the reduction of electrical risks, reinforcing the need for well-designed projects, proper maintenance, and compliance with current technical standards.

Keywords: Electrical installations; Electrical protection; Low voltage; NBR 5410.

1 INTRODUÇÃO

A segurança em instalações elétricas de baixa tensão constitui um requisito fundamental para o funcionamento adequado dos sistemas elétricos, bem como para a preservação da integridade física dos usuários e a proteção de equipamentos e edificações. No Brasil, a norma ABNT NBR 5410 estabelece os critérios técnicos mínimos relacionados ao projeto, à execução e à manutenção dessas instalações, contemplando aspectos como dimensionamento de condutores, sistemas de aterramento e medidas de proteção contra choques elétricos, sobrecorrentes e sobretensões.

O avanço tecnológico e o aumento da demanda por energia elétrica em ambientes residenciais, comerciais e industriais têm contribuído para tornar as instalações elétricas cada vez mais complexas. Nesse cenário, os dispositivos de proteção elétrica em baixa tensão, como disjuntores, dispositivos diferenciais residuais (DR) e dispositivos de proteção contra surtos (DPS), assumem papel essencial na mitigação de riscos associados a falhas elétricas e na preservação da segurança das instalações.

A relevância deste estudo está relacionada à necessidade de compreender, a partir da literatura técnica e normativa, os princípios e fundamentos que orientam o emprego dos dispositivos de proteção elétrica em sistemas de baixa tensão. A ausência ou aplicação inadequada desses dispositivos pode comprometer a segurança das instalações, favorecer a ocorrência de falhas elétricas e aumentar os riscos de danos materiais e acidentes envolvendo energia elétrica.

Diante desse contexto, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão: como a literatura técnica e normativa apresenta os princípios relacionados ao uso de dispositivos de proteção elétrica em sistemas de baixa tensão conforme as diretrizes da ABNT NBR 5410? A discussão dessa temática permite ampliar o entendimento sobre a importância da conformidade normativa para a segurança e confiabilidade das instalações elétricas.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão de literatura sobre os dispositivos de proteção elétrica em sistemas de baixa tensão conforme a ABNT NBR 5410. Como objetivos específicos, pretende-se descrever os principais dispositivos de proteção elétrica abordados na literatura técnica, apresentar os fundamentos normativos relacionados à proteção em instalações elétricas de baixa tensão e discutir os aspectos conceituais presentes em estudos e documentos técnicos sobre o tema.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A pesquisa adotou o método de revisão bibliográfica, foi caracterizada como qualitativa e descritiva, e teve como objetivo reunir e analisar criticamente produções científicas já publicadas sobre dispositivos de proteção elétrica em sistemas de baixa tensão. Foram considerados trabalhos publicados nos últimos dez anos, assegurando a atualização e a relevância das fontes consultadas. Os critérios de inclusão contemplaram artigos e livros em português e inglês que abordaram aspectos técnicos e normativos relacionados à NBR 5410 e aos dispo-

sitivos de proteção elétrica, enquanto foram excluídos resumos, revisões e publicações sem conteúdo científico consolidado.

A busca foi realizada em bases de dados acadêmicas reconhecidas, como *Scielo*, *IEEE Xplore* e *Google Scholar*, além de livros técnicos e normas oficiais disponíveis em bibliotecas digitais. Os descritores utilizados incluíram termos como “dispositivos de proteção elétrica”, “NBR 5410”, “baixa tensão”, “disjuntores”, “DR”, “DPS” e “segurança elétrica”.

2.2 Resultados e Discussão

O desempenho adequado de uma instalação elétrica depende diretamente de um planejamento criterioso. Antes da execução, é indispensável a elaboração de um projeto que contemple desde os custos e prazos até os materiais e métodos construtivos previstos (Pinto; Oliveira; Santos, 2019).

Conforme determina a NBR 5410/2004, todo projeto deve atender a requisitos mínimos que garantam segurança e funcionalidade. Devem ser considerados parâmetros técnicos como capacidade de condução de corrente, queda de tensão admissível, temperatura ambiente e correntes de curto-circuito (Henao; Sarache; Gómez, 2019).

Conforme Silva, Costa e Ferreira (2020), a adoção desses critérios normativos reduz riscos e favorece a confiabilidade do sistema elétrico. Além disso, o atendimento às diretrizes técnicas contribui para a prevenção de falhas e para a adequação das instalações às necessidades do empreendimento em que o dimensionamento adequado torna-se parte essencial da concepção do projeto.

Outro aspecto indispensável é a definição das cargas e dos pontos de consumo ao longo do circuito. Devem ser indicados os trajetos dos eletrodutos, quadro de distribuição, caixas de passagem e número de circuitos parciais, com seus respectivos dispositivos de proteção (Silva; Costa; Ferreira, 2020).

Um projeto de qualidade também deve conter sua documentação técnica mínima. Entre os elementos previstos estão: plantas, esquemas unifilares e demais diagramas aplicáveis, detalhes construtivos, memorial descritivo e especificação dos componentes. A inclusão desses itens viabiliza a execução conforme o planejado e facilita eventuais manutenções (Pinto; Oliveira; Santos, 2019).

A 5410 define as exigências para garantir o uso seguro e adequado das instalações elétricas de baixa tensão, que compreendem sistemas de até 1.000 V em corrente alternada e 1.500 V em corrente contínua. Essa norma é amplamente empregada em ambientes prediais, públicos e comerciais, orientando os profissionais sobre procedimentos corretos e restrições técnicas (Minotti, 2022).

O Dispositivo Diferencial Residual (DR) é um equipamento de proteção elétrica destinado a interromper automaticamente o circuito quando ocorre uma corrente diferencial superior a um valor previamente definido. Em condições normais, a corrente que entra deve ser igual à que retorna, mantendo o equilíbrio elétrico do sistema. O termo DR é frequentemente utilizado de forma genérica na literatura técnica (Carvalho, 2021; Coelho *et al.*, 2019).

A Figura 1 apresenta exemplos de disjuntores diferenciais residuais (DR) utilizados em instalações elétricas. Esses dispositivos têm a função de detectar cor-

rentes de fuga para a terra e interromper automaticamente o circuito elétrico. O DR é essencial para a proteção contra choques elétricos e para aumentar a segurança das instalações (Carvalho, 2021; Coelho *et al.*, 2019).



Figura 1. Disjuntor termomagnético

Fonte: Adaptado Carvalho (2021).

Do ponto de vista conceitual, quando o dispositivo possui apenas a função de detectar correntes de fuga, ele é denominado Interruptor Diferencial Residual (IDR). Por outro lado, quando também incorpora proteção contra sobrecorrentes, como sobrecarga e curto-circuito, é chamado de Disjuntor Diferencial Residual (DDR). Essa distinção é importante para a correta especificação dos equipamentos em projetos elétricos. Entretanto, na prática, o termo DR costuma ser utilizado de forma abrangente para ambos os dispositivos (Carvalho, 2021).

O princípio de funcionamento do DR baseia-se em fundamentos do eletromagnetismo aplicados ao monitoramento do equilíbrio das correntes em um circuito. O dispositivo possui um núcleo toroidal ferromagnético por onde passam os condutores de fase e neutro. Em condições normais de operação, a soma das correntes que entram e saem do circuito é nula. Como consequência, os campos magnéticos gerados por essas correntes se anulam no interior do núcleo (Cantanhede, 2021).

Quando ocorre uma fuga de corrente para a terra, provocada por falhas de isolamento ou contato acidental com partes energizadas, parte da corrente não retorna pelos condutores monitorados. Esse desequilíbrio gera um fluxo magnético resultante no núcleo toroidal do dispositivo. A variação desse fluxo induz uma tensão em uma bobina secundária, que aciona um mecanismo de disparo. Dessa forma, o DR interrompe rapidamente o circuito protegido (Cantanhede, 2021).

É importante destacar que o DR possui função distinta do disjuntor termomagnético. Enquanto o DR é projetado para detectar pequenas correntes de fuga na faixa de miliamperes, o disjuntor atua na proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, geralmente na faixa de ampères. Assim, esses dispositivos são complementares dentro de um sistema de proteção elétrica. A utilização conjunta garante maior segurança e confiabilidade às instalações elétricas (Coelho *et al.*, 2019; Bongioiolo, 2018).

A Figura 2 apresenta um exemplo de disjuntor termomagnético utilizado em sistemas de proteção de instalações elétricas. À esquerda, observa-se um dia-

grama interno do dispositivo, indicando componentes como o elemento bimetálico, o sistema magnético, os contatos e o dispositivo de extinção de arco elétrico. No centro da figura é mostrado um disjuntor comercial, amplamente utilizado em quadros de distribuição (Da Rocha *et al.*, 2022).



Figura 2. Disjuntor termomagnético

Fonte: Adaptado Da Rocha *et al.* (2022).

À direita, é apresentado um diagrama elétrico simplificado que ilustra a conexão do disjuntor no circuito, incluindo a presença de contatos auxiliares. Esse tipo de dispositivo combina dois mecanismos de proteção: o térmico, que atua em situações de sobrecarga, e o magnético, que responde rapidamente a curtos-circuitos, garantindo maior segurança e confiabilidade às instalações elétricas.

2.2.1 Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS)

A verificação da ausência de tensão, seguida da instalação de aterramento temporário, assegura que não haja riscos residuais. Além disso, a proteção de componentes energizados presentes na área controlada restringe o acesso apenas a profissionais habilitados, conforme determinações da NR-10 e sua aplicabilidade prática em ambientes industriais (Da Rocha *et al.*, 2022).

O Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) é um equipamento essencial nas instalações elétricas modernas, sendo responsável por proteger circuitos e equipamentos contra sobretensões transitórias. Essas sobretensões podem ocorrer devido a descargas atmosféricas, manobras na rede elétrica ou perturbações no sistema de distribuição de energia (Lima, 2021).

Durante o funcionamento normal do sistema elétrico, o DPS permanece em estado de alta impedância, ou seja, praticamente não conduz corrente elétrica. Entretanto, quando ocorre uma elevação abrupta da tensão, o dispositivo passa rapidamente para um estado de baixa impedância, conduzindo a corrente do surto para o aterramento (Gomes; Almeida, 2021).

Existem diferentes tipos de DPS, classificados de acordo com sua capacidade de descarga e local de aplicação na instalação elétrica. De modo geral, os dispositivos são classificados em Classe I, Classe II e Classe III. Os DPS Classe I são utilizados em pontos de entrada da instalação para proteção contra descargas atmosféricas diretas. Já os dispositivos Classe II são instalados em quadros de distribuição para proteção contra surtos induzidos, enquanto os Classe III são uti-

lizados para proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis (Lima *et al.*, 2020).

Entre os componentes utilizados em alguns modelos de DPS está o centelhador, que funciona por meio da formação de um arco elétrico entre dois eletrodos quando a tensão ultrapassa um determinado limite. Quando ocorre a sobre-tensão, esse arco cria um caminho condutor para que a corrente do surto seja desviada para o sistema de aterramento, evitando que a energia excessiva percorra os circuitos da instalação elétrica (Gusmão, 2023).

O princípio de funcionamento do DPS baseia-se na limitação das sobretensões transitórias. Quando um surto elétrico atinge o sistema, o dispositivo altera rapidamente seu comportamento elétrico, passando de um estado isolante para um estado condutor. Esse processo ocorre em frações de segundo, permitindo que a energia do surto seja dissipada de forma segura e evitando danos aos equipamentos elétricos e eletrônicos (Gomes; Almeida, 2021).

Durante o processo de atuação do DPS pode ocorrer a chamada corrente residual, que corresponde a uma pequena corrente que continua circulando após a atuação do dispositivo. Essa corrente é normalmente muito baixa e faz parte do funcionamento de determinados tipos de dispositivos de proteção (Gusmão, 2023).

2.2.2 Aterramento Funcional

Segundo Dos Santos *et al.* (2023), a terra atua como um reservatório capaz de neutralizar cargas positivas ou negativas, garantindo maior segurança às instalações. A NBR 5410 estabelece que toda edificação possua um sistema de aterramento adequado, com estruturas como hastes, malhas metálicas ou anéis enterrados.

Conforme Lima (2021), os métodos construtivos previstos na NBR 5410 incluem o uso de armaduras das fundações, cabos metálicos imersos no concreto ou malhas subterrâneas. Esses sistemas são aplicados tanto em edificações convencionais quanto em instalações fotovoltaicas e industriais.

Segundo Pianelli (2025) destaca que existem três esquemas principais de aterramento definidos pela norma: TN, TT e IT. As letras iniciais indicam a forma de ligação da alimentação à terra, enquanto as seguintes representam o tratamento das massas metálicas. Em complementações como TN-S ou TN-C, define-se se os condutores de neutro e proteção são distintos ou combinados.

Gomes (2023) ressalta que as práticas de aterramento ainda se baseiam majoritariamente na NBR 5410:2004, embora alguns aspectos estejam defasados diante das tecnologias atuais. Para o autor, a correta aplicação do esquema TN contribui para reduzir riscos e falhas nas instalações elétricas. Ele aponta que a distinção entre os condutores no sistema TN-S favorece a confiabilidade e o funcionamento adequado conforme a figura a seguir:

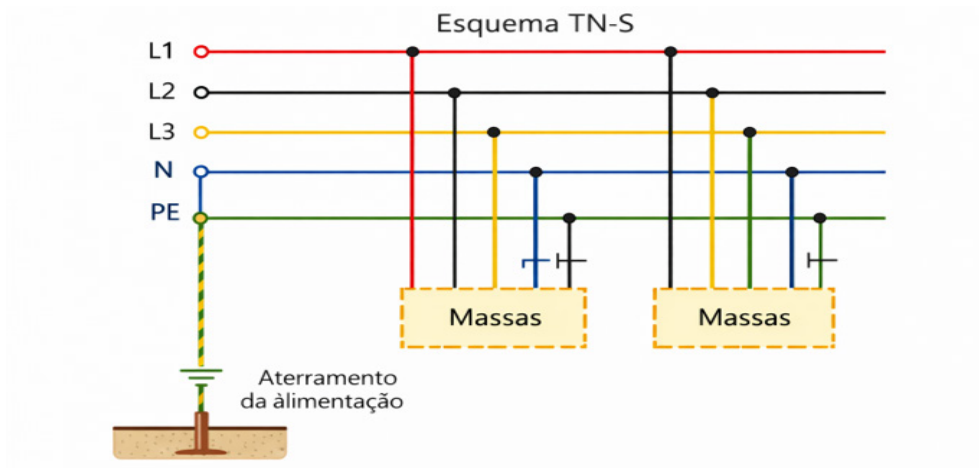


Figura 3. Sistema TN-S

Fonte: Adaptado Gomes (2023).

Nos sistemas do tipo TN-C, o mesmo condutor exerce simultaneamente as funções de neutro e proteção ao longo de toda a instalação. Esse fio combinado é chamado de PEN e substitui a separação entre neutro e aterramento. Trata-se de uma configuração que reduz a quantidade de condutores, mas exige cuidados adicionais quanto à continuidade do circuito (Cantanhede, 2021).

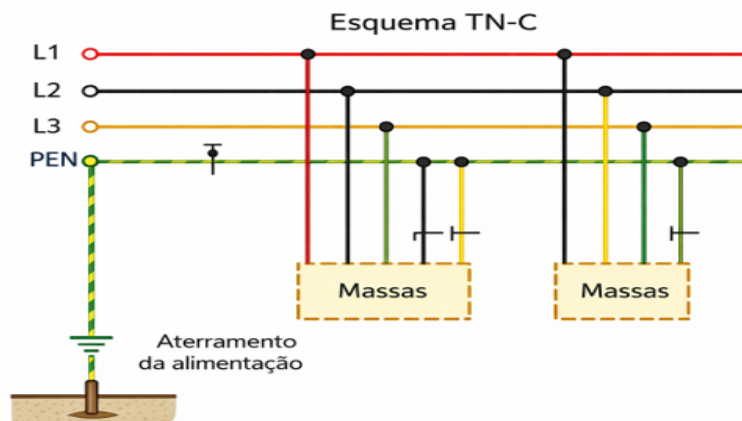


Figura 4. Sistema TN-C

Fonte: Adaptado Gomes (2023).

O esquema TN-C-S adota inicialmente um condutor combinado, semelhante ao TN-C, mas em parte do percurso ocorre a separação entre neutro e proteção. Dessa forma, o sistema utiliza o PEN apenas em um trecho e depois o divide em dois condutores distintos (Carvalho, 2021).

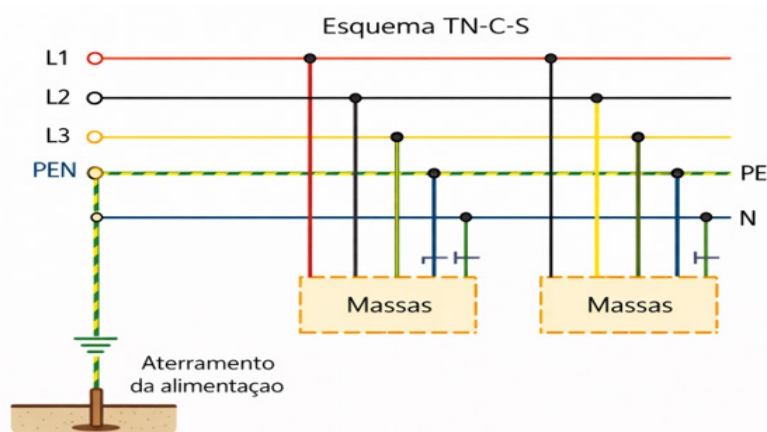


Figura 5. Sistema TN-C-S

Fonte: Adaptado Dantas (2019).

No esquema TT, a fonte de alimentação possui um ponto aterrado diretamente, enquanto as massas da instalação são conectadas a eletrodos de terra independentes. Essa separação cria caminhos distintos para as correntes de falha, exigindo dispositivos de proteção sensíveis (Bezerra *et al.*, 2024).

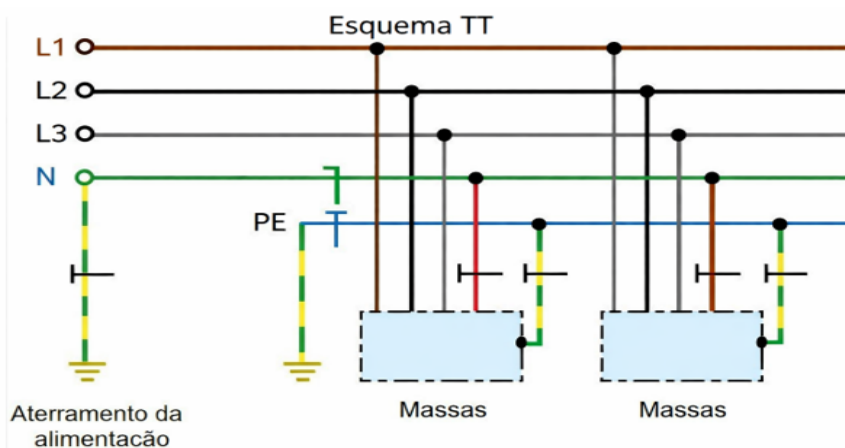


Figura 6. Sistema TT

Fonte: Adaptado Gomes (2023).

2.2.3 Dimensionamento, especificações e disjuntores elétricos

Os disjuntores são dispositivos de proteção e manobra capazes de conduzir e interromper correntes elétricas em condições normais e anormais de funcionamento, sendo estas últimas associadas a sobrecorrentes e curtos-circuitos (Silva *et al.*, 2018). O curto-circuito ocorre quando dois ou mais condutores entram em contato sem isolamento adequado, enquanto a sobrecarga caracteriza-se pelo aumento da corrente acima do valor nominal do circuito devido a fatores externos (Lima *et al.*, 2020).

Para a correta especificação dos disjuntores, é essencial compreender o seu princípio de funcionamento. Os disjuntores empregados no Brasil são, predominantemente, do tipo termomagnético, cuja denominação decorre da combinação de dois mecanismos distintos de atuação. Esses mecanismos garantem a proteção dos circuitos elétricos contra condições anormais de operação, como

sobrecargas e curtos-circuitos (Gomes; Almeida, 2021).

Os disjuntores são fundamentais para a proteção de circuitos elétricos, sendo projetados para atender diferentes níveis de corrente, tensão e complexidade das instalações. A correta escolha do tipo de disjuntor está diretamente relacionada à segurança, à seletividade e à confiabilidade do sistema elétrico, especialmente em ambientes industriais e comerciais (Coelho *et al.*, 2019).

Os disjuntores monopolar, bipolar e tripolar diferenciam-se principalmente pelo número de fases protegidas. O disjuntor monopolar é amplamente utilizado em circuitos monofásicos residenciais, enquanto o bipolar atende redes bifásicas, comuns em cargas de maior potência. Já o disjuntor tripolar é essencial em sistemas trifásicos, garantindo a interrupção simultânea das três fases (Lima *et al.*, 2020).

Quanto ao princípio de funcionamento, os disjuntores podem ser classificados como térmicos, magnéticos ou termomagnéticos. O disjuntor térmico atua contra sobrecargas por meio da deformação de um bimetal aquecido, enquanto o disjuntor magnético responde rapidamente a curtos-circuitos por ação eletromagnética. O modelo termomagnético combina ambos os mecanismos, sendo o mais utilizado em instalações modernas (Gomes; Almeida, 2021).

Em relação à construção, destacam-se os minidisjuntores, os disjuntores de caixa moldada e os disjuntores de caixa aberta. Os minidisjuntores são compactos e indicados para quadros de distribuição de pequeno e médio porte. Já os disjuntores de caixa moldada e de caixa aberta apresentam maior capacidade de interrupção e robustez, sendo empregados em sistemas de potência mais elevados (Santos; Rodrigues, 2019).

A distinção entre disjuntores residenciais e industriais está relacionada às exigências operacionais e aos níveis de corrente envolvidos. Enquanto os disjuntores residenciais priorizam simplicidade e proteção básica, os industriais incorporam ajustes avançados, seletividade e maior capacidade de interrupção. Essa diferenciação é essencial para garantir a continuidade operacional e a segurança de instalações elétricas complexas (Lima *et al.*, 2020).

O mecanismo térmico fundamenta-se no aquecimento gerado pela passagem da corrente elétrica, associado aos fenômenos de dilatação térmica e transferência de calor entre materiais metálicos. O mecanismo magnético atua a partir da intensificação do campo magnético produzido pela corrente elétrica, promovendo o desarme instantâneo em situações de elevada corrente (Santos; Rodrigues, 2019).

2.2.4 Dimensionamento de Disjuntores

O correto dimensionamento dos disjuntores deve considerar parâmetros fundamentais, como corrente nominal, capacidade de interrupção, número de polos, tensão e frequência de operação, tipo de curva de disparo (B, C ou D) e a integral de Joule, relacionada ao tempo de atuação do dispositivo (Coelho *et al.*, 2019).

Cada disjuntor apresenta uma curva de disparo específica, que deve ser selecionada conforme o tipo de carga a ser protegida. Assim, a primeira etapa do dimensionamento consiste na identificação da natureza da carga elétrica, que

pode ser resistiva, indutiva ou capacitiva. A escolha adequada da curva de disparo garante que o disjuntor atue corretamente frente às condições normais de operação e às situações de anomalia no circuito (Gomes; Almeida, 2021).

O dimensionamento inicia-se pelo levantamento detalhado das cargas elétricas do circuito, incluindo equipamentos, iluminação e demais dispositivos conectados. Para cada carga, deve-se identificar a potência nominal e, quando necessário, determinar a corrente elétrica associada. Em seguida, realiza-se o cálculo da corrente total do circuito, considerando a tensão de alimentação, o tipo de sistema elétrico e o fator de potência (Gomes; Almeida, 2021; Santos; Rodrigues, 2019).

Com a corrente total definida, procede-se ao dimensionamento dos condutores elétricos, cuja capacidade de condução de corrente deve ser compatível com os valores calculados. A escolha da bitola adequada é essencial para evitar aquecimento excessivo e garantir a segurança da instalação. Somente após essa etapa é possível selecionar o disjuntor apropriado para a proteção do circuito (Coelho *et al.*, 2019).

A escolha do disjuntor deve considerar uma corrente nominal compatível com a corrente do circuito, respeitando a capacidade máxima admissível dos condutores. Além disso, deve-se definir a curva de disparo do disjuntor em função do tipo de carga instalada, aplicando fatores de correção em condições especiais de instalação, como agrupamento de cabos ou temperaturas elevadas (Gomes; Almeida, 2021).

O dimensionamento adequado dos condutores elétricos é uma etapa fundamental no projeto de instalações elétricas, pois garante a condução segura da corrente elétrica e o funcionamento eficiente dos equipamentos. Esse processo envolve a escolha correta da seção do cabo com base na corrente que circulará no circuito, nas condições de instalação e na temperatura ambiente (Silva *et al.*, 2018).

A capacidade de corrente, também chamada de ampacidade, corresponde ao valor máximo de corrente elétrica que um condutor pode transportar continuamente sem ultrapassar limites de temperatura estabelecidos. Esse parâmetro depende do material do condutor, do tipo de isolamento, da forma de instalação e das condições ambientais (Lima *et al.*, 2020).

A seção mínima dos cabos elétricos é definida por normas técnicas para assegurar resistência mecânica e segurança na instalação elétrica. Mesmo em circuitos de baixa corrente, existe um valor mínimo de seção transversal que deve ser respeitado. Essa exigência evita danos físicos aos cabos e reduz a possibilidade de superaquecimento durante o funcionamento (Santos; Rodrigues, 2019).

A segurança ocupacional em instalações elétricas é um fator essencial para proteger os trabalhadores contra riscos como choques elétricos, queimaduras e outros acidentes. Durante atividades de instalação, manutenção ou inspeção, é necessário seguir procedimentos técnicos rigorosos e normas de segurança. Essas medidas visam reduzir os perigos presentes no ambiente de trabalho e garantir condições adequadas para a execução das tarefas (Marrón Mendoza, 2021).

Os Equipamentos de Proteção Individual são dispositivos utilizados pelos trabalhadores para protegê-los de riscos específicos presentes no ambiente de trabalho. Em atividades com eletricidade, destacam-se luvas isolantes, capacetes de proteção, botas dielétricas e óculos de segurança. Esses equipamentos redu-

zem os efeitos de possíveis acidentes e contribuem para a integridade física do profissional. O uso correto dos EPIs é obrigatório e deve estar associado a treinamento adequado (Pianeli, 2025).

Os Equipamentos de Proteção Coletiva são dispositivos ou medidas destinadas a proteger simultaneamente todos os trabalhadores presentes em um determinado ambiente. Diferentemente dos EPIs, os EPCs atuam diretamente na redução dos riscos no local de trabalho (Pianeli, 2025).

A prevenção de acidentes em serviços elétricos depende da combinação entre planejamento, treinamento e uso adequado de equipamentos de proteção. A aplicação correta das normas técnicas e das boas práticas de segurança contribui para reduzir significativamente os riscos ocupacionais (Minotti, 2024).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada evidencia que os sistemas de proteção em instalações elétricas de baixa tensão são fundamentais para garantir segurança operacional, confiabilidade e durabilidade dos sistemas. A correta aplicação dos dispositivos, aliada ao cumprimento das exigências da NBR 5410, reduz significativamente a ocorrência de falhas e acidentes, protegendo tanto os usuários quanto os equipamentos.

Além disso, observa-se que a integração entre dispositivos como disjuntores, DR e DPS constitui uma abordagem complementar e indispensável para a proteção eficaz das instalações. Cada componente desempenha uma função específica, e sua atuação conjunta amplia a capacidade de resposta frente a diferentes tipos de anomalias elétricas, desde correntes de fuga até sobretensões transitórias.

No entanto, o estudo também aponta desafios, como a defasagem de alguns aspectos normativos frente às novas tecnologias e a necessidade de maior capacitação técnica dos profissionais envolvidos na elaboração e execução de projetos elétricos. A evolução das demandas energéticas e a crescente complexidade das instalações exigem atualização constante das práticas e dos referenciais técnicos.

Como perspectivas futuras, destaca-se a importância de revisões periódicas da NBR 5410, incorporando inovações tecnológicas, como sistemas inteligentes de monitoramento e proteção. Além disso, pesquisas voltadas à automação, eficiência energética e integração com fontes renováveis tendem a ampliar o campo de estudo, contribuindo para instalações elétricas mais seguras, sustentáveis e adaptadas às exigências contemporâneas.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, Davi de Souza et al. **Modernização e adequação de uma instalação elétrica residencial unifamiliar**. 2024.

BONGIOLO, Guilherme Grazziotin. **Análise de sobretensões transitórias causadas por manobras de disjuntores a vácuo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.3.2019.tde-20032019-152652. Acesso em: 26 jan. 2026.

- CANTANHEDE, Marco Aurélio Silva. Padronização de aterramento em equipamentos elétricos móveis em canteiro de obras. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 7, n. 5, p. 46552-46589, 2021.
- CARVALHO, José Antônio Beleza. Esquemas de ligação à terra e proteção das pessoas em instalações elétricas de baixa tensão. **Neutro à Terra**, n. 27, p. 5-13, 2021.
- COELHO, F. et al. **Dimensionamento de disjuntores em sistemas elétricos industriais**. São Paulo: Atlas, 2019.
- COELHO, Poliane Maria Cirilo. **Estudo do sistema de proteção e seletividade em uma instalação industrial**. 2025. 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2025.
- CUNHA, Claybiane Vieira da. **Sistema de prevenção infantil contra acidentes elétricos em tomadas residenciais**. 60 f. 2023. Monografia (Engenharia de Controle e Automação) - Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial, Manaus, 2023.
- DA ROCHA, Felipe Paiva; PACHECO, Maria dos Anjos Fernandes; PINHEIRO, Érika Cristina Nogueira Marques. Adequação de um painel elétrico à NR-10 e NBR 5410 – Estudo de caso: em uma empresa do polo industrial de Manaus: Suitability of an electric panel to NR-10 and NBR 5410 – Case study: in a company in the industrial polo of Manaus. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 71494-71515, 2022.
- DOS SANTOS, Natã Braga Kelly et al. Aterramento elétrico, uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 5, p. 4656-4672, 2023.
- GOMES, R.; ALMEIDA, P. **Proteção de circuitos elétricos: disjuntores termomagnéticos e seletividade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2021.
- GUSMÃO, Igino Luís. **Análise de acidentes elétricos e medidas de prevenção sob a perspectiva da NR10**. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.
- LIMA, Helber Henrique da Silva. **Sistemas de proteção e aterramento em usinas fotovoltaicas: boas práticas internacionais e no Brasil**. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- LIMA, J. et al. **Critérios de seleção e aplicação de disjuntores em instalações elétricas modernas**. Recife: Ed. UFPE, 2020.
- MARRÓN MENDOZA, Aldo Iván. **Estudo, projeto e implementação de um módulo didático para análise de falhas em um sistema de distribuição de energia elétrica de TI, TI e TN para o Centro de Treinamento e Desenvolvimento da INTEA em Arequipa**. 2021.
- MINOTTI, Cristiano. Principais Características Das Curvas De Proteção De Disjuntores. **RECIMA-21-Revista Científica Multidisciplinar**-ISSN 2675-6218, 2024.
- PIANELI, Maicon Henrique. **A importância da instalação do aterramento temporário em serviços de manutenção em redes de distribuição**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2025.
- SANTOS, M.; RODRIGUES, A. **Disjuntores de caixa aberta e moldada: características construtivas e aplicações**. Belo Horizonte: UFMG, 2019.
- SILVA, L. et al. **Análise de proteção elétrica em circuitos residenciais e industriais**. Porto Alegre: Bookman, 2018.



Capítulo 2

A IMPORTÂNCIA DO POWER BI NA GESTÃO DE TERMINAIS LOGÍSTICOS DE GRANÉIS SÓLIDOS E LÍQUIDOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

THE IMPORTANCE OF POWER BI IN THE MANAGEMENT OF SOLID AND LIQUID BULK LOGISTICS TERMINALS: A LITERATURE REVIEW

Caio Eduardo Almeida de Lima¹

Antônio Merval Machado Tavares²

Mirian Nunes de Carvalho Nunes³

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

³ Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão de literatura sobre a gestão de capacidade em terminais de grãos sólidos e líquidos e o uso do Power BI como ferramenta de apoio à tomada de decisão. São discutidos modelos e indicadores utilizados para dimensionar pátios, berços e sistemas de recebimento e expedição, bem como seus impactos na eficiência operacional e nos custos logísticos. Em paralelo, são analisadas aplicações do Power BI na integração de dados, construção de painéis de indicadores e monitoramento de desempenho em ambientes logísticos e produtivos. Propõe-se analisar como o Power BI pode transformar grandes volumes de dados logísticos em indicadores confiáveis para apoiar decisões em terminais logísticos. Com base nos estudos aplicados do campo da Engenharia Mecânica, utilizou-se como pilar referencial bibliográfico Mulinas *et al.* (2012), Kerzner (2017) e Santos, A. S.; Baptista, J. A. A (2023), dentre outros. O método de aplicação para a referente pesquisa consiste em uma revisão bibliográfica, de natureza exploratória e qualitativa.

Palavras-chave: Gestão de capacidade; Terminais logísticos; Power BI; Tomada de decisão; Eficiência operacional.

Abstract

This study presents a literature review on capacity management in solid and liquid bulk terminals and the use of Power BI as a decision-support tool. It discusses models and indicators used for sizing yards, berths, and receiving and dispatching systems, as well as their impact on operational efficiency and logistics costs. Concurrently, the paper analyzes Power BI applications regarding data integration, the development of key performance indicator (KPI) dashboards, and performance monitoring within logistics and production environments. The research aims to analyze how Power BI can transform large volumes of logistics data into reliable indicators to support decision-making in logistics terminals. Drawing from applied studies in the field of Mechanical Engineering, the theoretical framework is based on Mulinas *et al.* (2012), Kerzner (2017), and Santos and Baptista (2023), among others. The methodology consists of a bibliographic review with an exploratory and qualitative approach.

Keywords: Capacity management; Logistics terminals; Power BI; Decision-making. Operational efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A produção agroindustrial brasileira cresceu de forma significativa nas últimas décadas, pressionando a infraestrutura logística responsável pelo escoamento de grandes volumes de grãos sólidos e líquidos (Gaban *et al.*, 2017). Nesse cenário, gargalos em armazenagem, transporte e operação portuária comprometem o desempenho do agronegócio, elevam custos logísticos e reduzem a competitividade do país no comércio internacional (Santos; Baptista, 2023).

Relatórios do MAPA (2023) e CONAB (2025) mostram que, embora a produção de grãos avance, a capacidade de terminais e a oferta de infraestrutura nem sempre acompanham esse crescimento, gerando filas, atrasos e perdas de eficiência ao longo da cadeia logística. Nos terminais de grãos, a capacidade não se limita ao volume estático de armazenagem, mas envolve a dinâmica de fluxo de cargas e a interação entre diferentes elementos operacionais (Mulinas *et al.*, 2012).

Portanto, indicadores como giros de estoque, capacidade dinâmica anual, produtividade de berços e desempenho de sistemas de recebimento e expedição são fundamentais para avaliar o potencial de movimentação e antecipar gargalos em períodos de maior demanda (EPL, 2018). Tais análises demonstram que decisões equivocadas sobre capacidade podem levar tanto à ociosidade de recursos quanto ao congestionamento de pátios e berços, com impactos diretos na eficiência e nos custos das operações (Kerzner, 2017).

O artigo “Relatórios dinâmicos com o Microsoft Power BI em uma empresa de transportes: auxílio na tomada de decisão” (Bezerra *et al.*, 2020), evidencia que essas plataformas permitem consolidar informações dispersas, gerar visualizações interativas e acompanhar métricas como volumes movimentados, tempos de ciclo e utilização de recursos em tempo quase real, além de ser indispensável para a sobrevivência de qualquer empresa na atualidade.

Atualmente, a falta de dados pode ser negativamente determinante para os resultados de qualquer tipo de empresa moderna, em especial para as que lidam com logística multimodal, que, somada à variedade de cargas que passam pelos seus terminais todos os dias, resulta em milhares de indicadores perdidos.

O estudo “The Importance of Data-Driven Strategic Decision-Making in Logistics” (Dumitrăşconiu; Sîrbu; Vasiliu, 2024), mostra que decisões estratégicas baseadas em dados são fundamentais para otimizar recursos, melhorar a eficiência operacional e sustentar vantagem competitiva, de modo que operar sem uma abordagem de análise de dados e Business Intelligence tende a comprometer gravemente o desempenho do negócio a longo prazo.

Ao mesmo tempo, a evolução das tecnologias de informação tem ampliado o uso de soluções de Business Intelligence para transformar dados operacionais em informações gerenciais. Ferramentas como o Power BI vêm sendo empregadas para integrar bases de dados, construir painéis de indicadores e apoiar análises de desempenho em setores como agronegócio, logística e produção industrial (Santos *et al.*, 2021; Pantoni, 2024).

Com base no cenário exposto, em que a produção cresce mais rápido do que a capacidade de armazenagem e escoamento, onde decisões precisam ser tomadas sob pressão, torna-se inevitável questionar como os terminais podem continuar operando de forma eficiente sem uma visão clara de sua própria ca-

pacidade e desempenho. Desta forma, como o Power BI pode transformar esse grande fluxo de informações em indicadores confiáveis, capazes de sustentar decisões mais seguras em ambientes complexos de logística multimodal?

Diante desse contexto, o presente estudo visa analisar como a literatura aborda, de forma conjunta, os modelos de capacidade em terminais de graneis e o uso de ferramentas de BI, em especial o Power BI, na gestão de operações logísticas (Mulinas *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2021).

Como objetivos específicos, buscou-se identificar os principais indicadores e fórmulas utilizados para dimensionar pátios, berços e sistemas de recebimento e expedição; foram analisados estudos que empregaram ferramentas de BI em contextos logísticos e agroindustriais; e discutiu-se de que maneira essa base teórica sustentou o desenvolvimento de ferramentas aplicadas, como calculadoras de capacidade em Power BI (Santos *et al.*, 2021; Pantoni, 2024).

Dessa forma, pretende-se contribuir para uma visão sistematizada do tema, articulando os modelos de capacidade e o uso do Power BI com os conhecimentos adquiridos durante a graduação em Engenharia Mecânica. Ao relacionar conceitos de projeto, análise de sistemas e gestão de operações, o estudo reforça a aplicação prática desses conteúdos na solução de problemas reais em terminais de graneis.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de natureza exploratória e qualitativa, voltada à análise de modelos de capacidade em terminais de graneis e de aplicações do Power BI na gestão de indicadores logísticos e operacionais.

A revisão baseia-se em materiais já publicados, incluindo artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, livros, documentos técnicos e relatórios de órgãos oficiais, permitindo a construção de uma síntese crítica sobre o tema, especialmente na literatura aplicada dos autores Mulinas *et al.* (2012), Kerzner (2017) e Santos, A. S.; Baptista, J. A. A (2023).

A abordagem qualitativa foi adotada para interpretar conceitos, métodos e usos relatados na literatura, priorizando a compreensão dos modelos e das aplicações em detrimento da reprodução de cálculos específicos ou estudos de caso isolados.

A coleta de dados compreendeu o período de 2012 a 2025, contemplando publicações recentes que discutem tanto a evolução da logística do agronegócio quanto a adoção de ferramentas de BI em ambientes produtivos e logísticos. Foram utilizadas bases acadêmicas como Google Acadêmico e SciELO, além de repositórios institucionais de universidades e bases de periódicos que reúnem trabalhos na área de engenharia, logística e agronegócio.

Complementarmente, consultaram-se sites oficiais e documentos de instituições setoriais, como o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e a Empresa de Planejamento e Logística (EPL), que fornecem dados estatísticos e relatórios técnicos relevantes para a

compreensão da capacidade logística e da movimentação de graneis.

Os descritores utilizados nas buscas incluíram termos em português e inglês, tais como “logística do agronegócio”, “capacidade de terminais portuários”, “graneis sólidos e líquidos”, “Business Intelligence na logística”, “Power BI na gestão de operações” e “indicadores de desempenho logístico”.

Como critérios de inclusão, consideraram-se trabalhos completos (artigos, dissertações, TCCs, livros e relatórios técnicos) que abordassem, de forma direta, modelos de capacidade em terminais, gestão de indicadores logísticos ou uso de ferramentas de BI em contextos produtivos e logísticos, nos idiomas português e inglês.

Foram excluídos resumos expandidos sem aprofundamento, publicações que tratavam apenas de aspectos genéricos de tecnologia da informação sem vínculo com gestão de operações, textos de opinião e materiais caracterizados como primeiras impressões ou notas pouco estruturadas.

Após a seleção inicial, os documentos foram analisados quanto ao tipo de terminal ou sistema logístico abordado, às variáveis e fórmulas de capacidade utilizadas, aos indicadores de desempenho destacados e ao papel atribuído ao BI e ao Power BI na consolidação e análise de dados.

Em seguida, os conteúdos foram organizados em eixos temáticos, permitindo discutir, nos resultados, a convergência entre os modelos de capacidade descritos na literatura e as possibilidades de sua incorporação em ferramentas de BI, como o desenvolvimento de uma calculadora de capacidade em Power BI para terminais de graneis.

2.2 Resultados e Discussão

Na modelagem de capacidade de terminais, autores como Mulinas *et al.* (2012) e Santos; Baptista (2023), destacam que indicadores são base para estimar o potencial de movimentação e antecipar gargalos em períodos de pico. Relatórios setoriais da EPL (Empresa de Planejamento e Logística) mostram que esses aspectos são particularmente críticos nas cadeias de grãos, em que o descompasso entre safra e infraestrutura acentua a pressão sobre terminais e sistemas de transporte.

Em soma, a falta de alinhamento entre capacidade e demanda resulta em filas de veículos e navios, tempos de espera elevados e incremento de custos logísticos, reforçando a necessidade de modelos quantitativos de apoio ao planejamento (EPL, 2018).

No contexto portuário, o manual de Mulinas (2012) descreve metodologias específicas para o cálculo de capacidade de pátios, berços e sistemas de recepção e expedição, considerando variáveis como densidade das cargas, fatores de estiva, produtividade dos equipamentos, tempo de manobra e eficiência operacional. Além disso, o manual relaciona TEU movimentado por ano, altura de pilha, *ground slots* e área de pátio, permitindo dimensionar a capacidade em função de parâmetros operacionais e de configurações físicas do terminal.

Autores como Kerzner (2017) ressaltam que a definição de capacidade deve considerar as incertezas de demanda, as restrições físicas e os riscos operacionais

associados às operações de carga e descarga. Nessa perspectiva, compreende-se que a capacidade não é um valor único e fixo, mas um intervalo condicionado por fatores como confiabilidade dos equipamentos, disponibilidade de janelas de atracação, condições ambientais e eficiência dos processos de recebimento e expedição (EPL, 2018).

Diante disso, Pantoni (2024), sugere que indicadores operacionais são fundamentais para monitorar a performance de terminais e orientar decisões de investimento em infraestrutura de grãos sólidos e líquidos. Paralelamente, segundo Santos *et al.* (2021), cresce o número de análises que discutem a aplicação de ferramentas de Business Intelligence na gestão de operações logísticas e agroindustriais, evidenciando a importância da análise de dados para apoiar decisões em ambientes complexos.

Em contextos logísticos, o Power BI vem sendo empregado para monitorar fluxos de entrada e saída, controlar estoques, acompanhar tempos de ciclo e consolidar indicadores de desempenho, substituindo planilhas estáticas por ambientes interativos de análise. Já em aplicações voltadas ao agronegócio, Pantoni (2024), cita que o uso do Power BI contribui para o monitoramento, controle de estoques e a análise de desempenho logístico, possibilitando identificar rapidamente gargalos, desvios em relação a metas e oportunidades de melhoria.

A integração entre os modelos de capacidade e o uso de ferramentas de BI emerge como uma oportunidade para aprimorar a gestão de terminais de grãos, particularmente em cadeias ligadas ao agronegócio (CONAB, 2025). Ao incorporar indicadores como capacidade estática, giros anuais, volumes movimentados e taxas de ocupação de berço em painéis de Power BI, torna-se possível acompanhar a performance dos terminais de forma contínua, simular cenários de expansão ou restrição de capacidade e apoiar o planejamento de investimentos, com base em dados atualizados e visualizações intuitivas (EPL, 2018).

Já a obra de Gaban *et al.* (2017) sugere que essa combinação de modelos quantitativos consolidados com plataformas de BI amplia a capacidade dos gestores de identificar tendências, antecipar gargalos e tomar decisões fundamentadas, especialmente em operações sujeitas a variações sazonais e alta competição em custos.

Nesse sentido, o desenvolvimento de uma calculadora de capacidade em Power BI para terminais de grãos sólidos e líquidos pode ser compreendido como uma aplicação prática oriunda da correlação das bases conceituais citadas neste trabalho, permitindo que engenheiros e gestores manipulem variáveis, avaliem cenários e visualizem impactos sobre a capacidade global do terminal em tempo quase real (Mulinas *et al.*, 2012; EPL, 2018).

Sob a ótica da Engenharia, essa integração reforça a conexão entre os conhecimentos bibliográficos e práticos adquiridos durante a graduação, demonstrando como modelos teóricos podem ser incorporados a soluções digitais para apoiar a tomada de decisão em terminais logísticos de grãos, em alinhamento com as demandas atuais de digitalização e análise de dados.

3 CONCLUSÃO

A revisão de literatura mostrou que a gestão de capacidade em terminais de granéis sólidos e líquidos depende de modelos quantitativos bem estruturados, que considerem características físicas da infraestrutura, perfil de demanda e desempenho operacional ao longo do tempo.

Indicadores como capacidade estática, giros anuais, taxa de ocupação de berço, produtividade de equipamentos e sazonalidade aparecem de forma recorrente e se consolidam como base para o planejamento e o controle das operações em terminais.

Quando esses elementos não são adequadamente dimensionados ou monitorados, surgem filas, atrasos, custos adicionais e perda de competitividade, o que reforça a importância de uma abordagem técnica consistente para tomada de decisão nesses ambientes.

O estudo também evidenciou que ferramentas de Business Intelligence, em especial o Power BI, vêm se consolidando como aliadas na gestão de operações logísticas e produtivas. Ao integrar dados de diferentes fontes e permitir a construção de painéis interativos, essas ferramentas ampliam a capacidade de monitorar indicadores em tempo quase real, de realizar análises comparativas e de comunicar resultados de forma clara para diferentes níveis da organização.

Em ambientes complexos, como os terminais de granéis associados ao agro-negócio, essa visão integrada dos dados favorece a identificação de gargalos, a avaliação de cenários alternativos e o alinhamento entre planejamento estratégico e execução operacional, reduzindo a dependência de planilhas isoladas e relatórios pouco dinâmicos.

Ao articular modelos de capacidade e uso do Power BI, percebe-se que há um potencial relevante para o desenvolvimento de soluções aplicadas que aproximem teoria e prática na gestão de terminais de granéis sólidos e líquidos. A concepção de uma calculadora de capacidade em Power BI pode ser entendida como desdobramento natural da literatura revisada, ao traduzir fórmulas e indicadores consolidados para um ambiente digital acessível e dinâmico.

Com isso, abre-se espaço para que engenheiros e gestores simulem cenários, testem combinações de variáveis e visualizem de forma intuitiva os impactos de decisões sobre a capacidade e o desempenho dos terminais, apoiando uma cultura de decisão orientada por dados.

Essa integração entre modelos conceituais e ferramentas digitais contribui para colocar em prática conhecimentos adquiridos durante a graduação em Engenharia Mecânica, especialmente aqueles ligados à análise de sistemas, gestão de operações e planejamento de infraestrutura.

Ao mesmo tempo, aponta possibilidades para estudos futuros, envolvendo validação da calculadora em casos reais de terminais de granéis, uso de dados em tempo real, integração com outros sistemas corporativos e aplicação de técnicas mais avançadas de análise, como simulação e inteligência artificial. Dessa forma, a presente pesquisa reforça a importância de combinar fundamentos teóricos, domínio de ferramentas de BI e compreensão do contexto operacional para enfrentar os desafios contemporâneos da logística de granéis.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE OPERADORES LOGÍSTICOS (ABOL). **Agro perde bilhões com falta de investimento em infraestrutura e logística**. Disponível em: <https://abolbrasil.org.br/noticias/noticias/agro-perde-bilhoes-com-falta-de-investimento-em-infraestrutura-e-logistica>. Acesso em: 29 ago. 2025.
- BEZERRA, B.D.; PEREIRA, L.; SILVEIRA, W.B. da; TALLACH, V. **Relatórios dinâmicos com o Micro-soft power BI em uma empresa de transportes: auxílio na tomada de decisão**. Guarulhos: Fafec Guarulhos, 2020. 10p. Trabalho de Graduação (Tecnólogo em Logística) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de Guarulhos.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim logístico**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/logistica/boletim-logistico/boletim-logistico-janeiro-2025.pdf/view>. Acesso em: 1 set. 2025.
- DUMITRĂȘCONIU, B.; SÎRBU, M. O.; VASILIU, C. **The importance of data-driven strategic decision-making in logistics**. BASIQ 2024 International Conference on New Trends in Sustainable Business and Consumption, 2024.
- EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA (EPL). **Análise, procedimentos e resultados de avaliações de custos operacionais de infraestruturas portuárias**. Vitória-ES, 2018.
- GABAN, A. C. *et al.* Evolução da produção de grãos e armazenagem: perspectivas do agronegócio brasileiro para 2024/25. **IGepec**, Toledo, v. 21, n. 1, p. 28–47, jan./jun. 2017.
- KERZNER, H. **Riscos em infraestruturas de transporte**. Porto Alegre: Bookman, 2017.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). **Exportações do agronegócio fecham 2023 com US\$ 166,55 bilhões em vendas**.
- MULINAS, A. M. *et al.* **Seaport capacity manual: application to container terminals**. Valencia-port Foundation, 2012.
- PANTONI, B. O. H. **Análise de dados com o Power BI aplicado ao agronegócio**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Agronegócio) – FATEC São José do Rio Preto, 2024.
- SANTOS, A. S.; BAPTISTA, J. A. A. **Gargalos da infraestrutura logística do Brasil e o impacto no comércio exterior**. 2023.
- SANTOS, N. B.; SANTOS, R. F.; PEREIRA, T. R. **O suporte de ferramentas de TI na logística: um estudo de caso sobre o Power BI**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Logística) – Faculdade de Tecnologia Deputado Ary Fossen, Jundiaí, 2021.



Capítulo 3

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO NA CONSTRUÇÃO

CIVIL REUSE OF WASTE IN CIVIL CONSTRUCTION

Ilsonar De Aguiar Costa¹

Mirian Nunes de Carvalho Nunes²

José Atila Matos Aroucha Júnior³

¹ Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

³ Docente, Engenheiro Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

O reaproveitamento de resíduos na construção civil tem se destacado como uma alternativa sustentável diante dos impactos ambientais e econômicos gerados pelo elevado volume de resíduos produzidos pelo setor. Este estudo tem como objetivo compreender os benefícios e desafios relacionados à reutilização de resíduos da construção civil, considerando seus impactos ambientais, econômicos e operacionais. Trata-se de uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem descritiva, desenvolvidas por meio de revisão bibliográfica em bases de dados acadêmicas, como Google Acadêmico, SciELO e PubMed, contemplando publicações entre os anos de 2020 e 2025. Os resultados evidenciam que o reaproveitamento de resíduos contribui significativamente para a redução da exploração de recursos naturais, diminuição de custos nas obras e mitigação dos impactos ambientais, como a poluição do solo e da água. No entanto, ainda existem desafios importantes, como a falta de políticas públicas eficazes, limitações técnicas, dificuldades logísticas e baixa adesão por parte dos profissionais do setor. Conclui-se que, apesar dos avanços, é necessário ampliar o incentivo à adoção de práticas sustentáveis, promovendo maior conscientização, inovação tecnológica e fortalecimento de normas que favoreçam a gestão eficiente dos resíduos na construção civil.

Palavras-Chave: Reaproveitamento de resíduos. Construção civil. Sustentabilidade. Gestão de resíduos. Impactos ambientais.

Abstract

The reuse of construction waste has emerged as a sustainable alternative in the face of the environmental and economic impacts generated by the high volume of waste produced by the sector. This study aims to understand the benefits and challenges related to the reuse of construction waste, considering its environmental, economic, and operational impacts. This is a qualitative research study with a descriptive approach, developed through a literature review in academic databases such as Google Scholar, SciELO, and PubMed, encompassing publications between 2020 and 2025. The results show that the reuse of waste contributes significantly to reducing the exploitation of natural resources, decreasing construction costs, and mitigating environmental impacts such as soil and water pollution. However, important challenges remain, such as the lack of effective public policies, technical limitations, logistical difficulties, and low adoption by professionals in the sector. It is concluded that, despite the progress made, it is necessary to expand incentives for the adoption of sustainable practices, promoting greater awareness, technological innovation, and strengthening regulations that favor the efficient management of waste in the construction industry.

Keywords: Waste reuse. Construction. Sustainability. Waste management. Environmental impacts.

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos provenientes da construção civil representa um dos principais desafios ambientais no Brasil, correspondendo a uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos — estima-se que até 70% do lixo gerado nas cidades tenha origem nesse setor, com perdas de materiais que ultrapassam 50% em obras típicas (ABNT, 2004).

De acordo com Domingues e Nunes (2023), o cenário brasileiro apresenta tanto oportunidades quanto barreiras no reaproveitamento de RCD. Por meio de uma revisão sistemática, os autores identificaram benefícios econômicos e ambientais — como a diminuição de gastos e a promoção da sustentabilidade —, ao mesmo tempo em que apontaram desafios significativos como a escassez de políticas públicas robustas e a falta de dados confiáveis sobre a geração e gestão desses resíduos.

Além disso, segundo Konzen e Pereira (2023), a aplicação de métodos como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem permitido identificar os impactos ambientais associados ao aproveitamento de RCD desde sua geração até sua reinserção como recurso construtivo. Essa abordagem possibilita uma compreensão abrangente dos efeitos ambientais ao longo de todo o ciclo, auxiliando na elaboração de estratégias mais eficientes e direcionadas para o reaproveitamento sustentável.

Conforme destacado por Oliveira, Santos e Hippert (2023), a adoção de medidas baseadas em revisão bibliográfica contribui para incentivar empresas a incorporarem o reaproveitamento de RCD em suas práticas cotidianas, sempre em consonância com a legislação vigente. As evidências apontam que, embora existam avanços nas iniciativas brasileiras, ainda há uma necessidade premente de maior adesão por parte dos agentes da construção, especialmente na implementação de políticas efetivas que promovam a circularidade dos materiais.

O reaproveitamento de resíduos na construção civil tem se tornado um tema cada vez mais relevante diante dos desafios ambientais e econômicos enfrentados pela sociedade contemporânea. A construção civil é uma das atividades que mais geram resíduos sólidos, e o descarte inadequado desses materiais pode causar diversos impactos ao meio ambiente, como a poluição do solo e da água, além de contribuir para o aumento do volume de resíduos destinados a aterros. Nesse contexto, discutir e estudar alternativas de reaproveitamento desses materiais torna-se fundamental para incentivar práticas mais sustentáveis no setor, reduzir custos nas obras e promover o uso mais eficiente dos recursos naturais. Além disso, o debate sobre essa temática contribui para a formação de profissionais mais conscientes e preparados para lidar com as exigências ambientais e tecnológicas da área, fortalecendo a busca por soluções inovadoras que aliem desenvolvimento econômico e responsabilidade ambiental.

Diante desse cenário, surge a seguinte problemática: como o reaproveitamento de resíduos na construção civil pode contribuir para a redução dos impactos ambientais e econômicos, e quais são os principais desafios para a sua efetiva implementação no setor?

A partir dessa questão, o presente estudo tem como objetivo geral compreender os benefícios e os desafios do reaproveitamento de resíduos na construção civil, considerando seus impactos ambientais, econômicos e operacionais. Para alcançar esse propósito, estabelecem-se como objetivos específicos identificar

os principais tipos de resíduos gerados na construção civil e suas possibilidades de reaproveitamento, descrever os impactos ambientais e econômicos da reutilização de resíduos nas obras, bem como estudar os principais entraves técnicos, logísticos e normativos que dificultam a efetiva implementação do reaproveitamento de resíduos no setor da construção civil.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada para este trabalho foi uma Revisão Bibliográfica, caracterizada por uma pesquisa qualitativa e descritiva, com o objetivo de compilar e analisar informações já publicadas sobre o reaproveitamento de resíduos na construção civil. Foi realizada uma busca nas principais bases de dados acadêmicas, incluindo Google Acadêmico, SciELO e PubMed, visando garantir um levantamento abrangente e atualizado sobre o tema.

Foram selecionados artigos científicos, livros e dissertações publicados no período entre 2020 e 2025, com o intuito de assegurar a atualidade e relevância das informações. Os critérios de inclusão abrangeram publicações em língua portuguesa e inglesa que abordaram especificamente aspectos relacionados ao reaproveitamento, à gestão e à sustentabilidade dos resíduos gerados na construção civil. Estudos que consistiram apenas em resumos, opiniões, primeiras impressões e revisões sistemáticas foram excluídos, a fim de priorizar conteúdos originais e completos.

As palavras-chave utilizadas para a busca dos materiais incluíram: “reaproveitamento de resíduos na construção civil”, “resíduos sólidos da construção”, “sustentabilidade na construção civil” e “gestão de resíduos na construção”. A análise dos dados coletados foi realizada por meio de leitura crítica e interpretação dos textos selecionados, permitindo a elaboração de uma síntese coerente e estruturada do conhecimento disponível, que foi apresentada na fundamentação teórica do trabalho.

2.2 Resultados e discussão

2.2.1 OS PRINCIPAIS TIPOS DE RESÍDUOS GERADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SUAS POSSIBILIDADES DE REAPROVEITAMENTO

Os resíduos da construção civil correspondem aos materiais utilizados durante a execução de uma obra que, após determinada etapa do processo construtivo, deixam de ter utilidade para a finalidade inicial e passam a ser considerados descartes. Esses resíduos podem surgir tanto durante a execução de atividades construtivas quanto em processos de reforma ou demolição. De acordo com Cardoso e Freitas (2022), nas áreas urbanas a construção civil representa uma das principais fontes geradoras de resíduos sólidos, sendo responsável por grande parte do volume de materiais descartados nas cidades.

Segundo Jacinto e Carvalho (2022), os resíduos provenientes da construção civil são classificados em diferentes categorias conforme suas características e possibilidades de reaproveitamento. A classe A inclui materiais como cerâmicas,

tijolos, blocos e azulejos, que possuem potencial para reutilização ou reciclagem em novas obras. A classe B abrange materiais recicláveis, como papel, vidro e madeira, que podem ser reaproveitados em outros processos produtivos. Já os resíduos classificados como classe C correspondem àqueles que ainda não possuem tecnologias economicamente viáveis para reciclagem, embora não sejam considerados perigosos. Por fim, a classe D engloba resíduos perigosos, como tintas, solventes e outros produtos químicos, que apresentam riscos ao meio ambiente e à saúde humana quando descartados de maneira inadequada.

O gerenciamento adequado dos resíduos da construção civil envolve um conjunto de práticas voltadas para a redução dos impactos ambientais gerados pelas atividades construtivas e para o uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Entre as estratégias mais utilizadas destaca-se a segregação dos resíduos no próprio canteiro de obras, permitindo que os materiais sejam separados conforme sua classificação. Essa prática, prevista na Resolução CONAMA nº 307/2002, facilita processos de reutilização, reciclagem e destinação final ambientalmente adequada (Mendonça, 2025).

Outra estratégia importante consiste na reutilização e reciclagem de materiais como concreto, argamassa, tijolos e blocos, que podem ser reaproveitados em aplicações como camadas de base ou preenchimentos em obras. Além disso, materiais como madeira, gesso, metais e plásticos também apresentam potencial de reciclagem, desde que atendam às condições técnicas e econômicas necessárias. Nesse contexto, a logística reversa também se destaca como uma alternativa relevante, pois permite o estabelecimento de parcerias com fornecedores e empresas recicladoras para o retorno de embalagens e sobras de materiais que podem ser reutilizados (Kabirifar, 2020).

A elaboração e aplicação do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) constitui uma ferramenta essencial para organizar e controlar o manejo dos resíduos gerados nas obras. Esse plano estabelece procedimentos relacionados à geração, armazenamento, transporte e destinação final dos resíduos, sendo frequentemente exigido por órgãos ambientais e administrações municipais como parte do processo de licenciamento de empreendimentos. Além disso, Maciel e Melhado (2020) destacam que a capacitação dos trabalhadores envolvidos nas atividades construtivas é fundamental para garantir o correto manuseio dos materiais e reduzir perdas e desperdícios.

O emprego de tecnologias construtivas mais sustentáveis também contribui significativamente para a redução da geração de resíduos. Métodos como a construção a seco e o uso de elementos pré-fabricados possibilitam maior controle do processo produtivo e menor desperdício de materiais. Além disso, o monitoramento contínuo dos resíduos gerados permite identificar falhas nos processos e aprimorar a gestão ambiental nas obras. Conforme apontam Felisardo e Santos (2021), a ausência de um planejamento adequado para a destinação dos resíduos pode se tornar um obstáculo para as empresas do setor, uma vez que a legislação atribui ao gerador a responsabilidade pela destinação ambientalmente correta desses materiais. De acordo com Kabirifar et al. (2020), a gestão adequada desses materiais é essencial para reduzir os impactos ambientais causados pelo setor e promover uma utilização mais eficiente dos recursos naturais. Nesse sentido, identificar os principais tipos de resíduos gerados e compreender suas possibilidades de reaproveitamento torna-se uma etapa fundamental para a implementação de práticas sustentáveis no setor da construção civil (TABELA 1).

Tabela 1. Principais tipos de resíduos da construção civil e possibilidades de reaproveitamento

Tipo de resíduo	Exemplos	Possibilidades de reaproveitamento
Resíduos cerâmicos e de concreto (Classe A)	Concreto, argamassa, tijolos, blocos, telhas e azulejos	Podem ser triturados e reutilizados como agregado reciclado em bases e sub-bases de pavimentação, produção de novos concretos, enchimentos e regularização de terrenos.
Madeira	Tábuas, pallets, caibros e restos de formas	Pode ser reutilizada em escoramentos, fabricação de mobiliário simples, produção de painéis ou encaminhada para reciclagem e geração de energia.
Metais	Vergalhões, fios de cobre, alumínio e aço	Possuem alto valor de reciclagem e podem ser encaminhados para indústrias metalúrgicas, retornando ao ciclo produtivo como matéria-prima.
Plásticos e embalagens	Embalagens de cimento, tubos de PVC, recipientes plásticos	Podem ser encaminhados para processos de reciclagem industrial, sendo transformados em novos produtos plásticos.
Gesso	Placas de gesso, restos de drywall	Pode ser reciclado e reutilizado na fabricação de novas placas ou utilizado como corretivo em algumas aplicações agrícolas, dependendo do tratamento.
Resíduos perigosos (Classe D)	Tintas, solventes, óleos, materiais contaminados	Exigem tratamento especializado e destinação adequada em locais licenciados, devido aos riscos ambientais e à saúde humana.

Fonte: Souza *et al.* (2022) e Maciel e Melhado (2020).

A adoção de práticas de segregação e reaproveitamento desses materiais no próprio canteiro de obras contribui significativamente para a redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários. Conforme destacam Mendonça (2025) e Maciel e Melhado (2020), a organização do canteiro e o planejamento das atividades construtivas permitem identificar e separar adequadamente os resíduos gerados, facilitando sua reutilização ou encaminhamento para reciclagem. Além disso, o gerenciamento adequado dos resíduos possibilita a diminuição de perdas de materiais e a redução de custos operacionais nas obras.

Estudos também apontam que o reaproveitamento de resíduos da construção civil pode gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos. Paulino *et al.* (2023) ressaltam que a reciclagem desses materiais contribui para diminuir a extração de recursos naturais e ampliar a vida útil dos aterros sanitários. Da mesma forma, Souza *et al.* (2022) destacam que o mapeamento e a gestão adequada dos resíduos possibilitam identificar oportunidades de reciclagem e reutilização, promovendo maior eficiência no setor. Por outro lado, Felisardo e Santos (2021) enfatizam que o crescimento das atividades urbanas e da geração de resíduos torna ainda mais urgente a implementação de políticas e práticas sustentáveis na construção civil, reforçando a importância do reaproveitamento desses materiais como estratégia para minimizar impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável.

2.2.2 OS IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS DA REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NAS OBRAS

O descarte inadequado dos resíduos da construção civil pode provocar diversos impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade. Kabirifar (2020) destaca que a disposição irregular desses materiais pode comprometer a paisagem urbana, dificultar a circulação de pedestres e veículos e causar problemas ambientais como o assoreamento de rios, córregos e lagos. Além disso, o acúmulo de resíduos pode obstruir sistemas de drenagem urbana, contribuindo para a ocorrência de enchentes, e ainda incentivar o descarte ilegal de outros tipos de lixo, favorecendo a proliferação de vetores de doenças.

De acordo com Paulino *et al.* (2023), quando os resíduos da construção civil são descartados em locais inadequados, como terrenos baldios, margens de rios ou vias públicas, podem surgir problemas que vão desde impactos ambientais até questões relacionadas à saúde pública. Entre os efeitos mais comuns estão a ocorrência de enchentes, deslizamentos e a redução da capacidade dos aterros sanitários, que passam a receber volumes excessivos de materiais, diminuindo sua vida útil.

Felisardo e Santos (2021) ressaltam ainda que o gerenciamento inadequado dos resíduos da construção civil também gera impactos econômicos para o poder público, especialmente para as prefeituras, que muitas vezes precisam arcar com custos elevados para a remoção e destinação desses materiais descartados irregularmente. Dessa forma, torna-se essencial que as normas e regulamentações relacionadas ao manejo desses resíduos sejam cumpridas de forma rigorosa, a fim de evitar prejuízos ambientais, sociais e financeiros.

A reutilização de resíduos na construção civil tem se destacado como uma estratégia importante para reduzir os impactos ambientais gerados pelo setor e, ao mesmo tempo, promover benefícios econômicos nas obras. A grande quantidade de resíduos produzidos durante atividades de construção, reforma e demolição representa um desafio significativo para a gestão ambiental urbana. Nesse contexto, práticas voltadas para o reaproveitamento de materiais contribuem para diminuir o volume de resíduos destinados a aterros, reduzir a extração de recursos naturais e incentivar modelos construtivos mais sustentáveis (Cunha *et al.*, 2023).

Do ponto de vista ambiental, a reutilização de resíduos contribui para a redução da poluição do solo, da água e do ar, uma vez que diminui o descarte irregular de materiais e o acúmulo de entulhos em áreas urbanas. Além disso, a reciclagem de resíduos como concreto, cerâmica e argamassa possibilita a produção de novos materiais de construção, reduzindo a necessidade de exploração de matérias-primas naturais, como areia e brita. Segundo Augusto Junior (2020), resíduos cerâmicos provenientes de obras podem ser reaproveitados como adições pozolânicas na produção de novos cimentos, demonstrando que materiais antes considerados descartáveis podem adquirir valor técnico e funcional dentro do processo produtivo.

Outro aspecto relevante está relacionado à inovação tecnológica no gerenciamento desses resíduos. Estudos recentes têm demonstrado que o uso de tecnologias digitais e ferramentas baseadas em inteligência artificial pode auxiliar no monitoramento, na classificação e na destinação adequada dos resíduos da

construção civil. De acordo com Alimi *et al.* (2025), a aplicação de sistemas inteligentes na gestão de resíduos permite otimizar processos, melhorar o controle dos materiais descartados e aumentar a eficiência das estratégias de reciclagem e reutilização, contribuindo para uma gestão mais sustentável no setor.

Sob a perspectiva econômica, o reaproveitamento de resíduos também apresenta vantagens significativas para empresas e gestores de obras. A reutilização de materiais pode reduzir custos relacionados à compra de novas matérias-primas, ao transporte de resíduos e à destinação final em aterros sanitários. Além disso, a adoção de práticas sustentáveis tende a aumentar a competitividade das empresas da construção civil, que passam a atender às exigências ambientais e às normas de sustentabilidade cada vez mais presentes no mercado. Cunha *et al.* (2023) destacam que a gestão adequada dos resíduos contribui não apenas para a preservação ambiental, mas também para a melhoria da eficiência produtiva e para a redução de desperdícios nas obras.

2.2.3 OS PRINCIPAIS ENTRAVES TÉCNICOS, LOGÍSTICOS E NORMATIVOS QUE DIFICULTAM A EFETIVA IMPLEMENTAÇÃO DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A implementação do reaproveitamento de resíduos na construção civil ainda enfrenta diversos desafios que dificultam sua aplicação efetiva nas obras. Esses entraves envolvem aspectos técnicos, logísticos e normativos que interferem diretamente na gestão adequada dos resíduos gerados durante os processos construtivos. Apesar dos avanços nas discussões sobre sustentabilidade e gestão de resíduos, muitos empreendimentos ainda apresentam dificuldades para adotar práticas eficientes de reaproveitamento, o que acaba contribuindo para o aumento do descarte inadequado e para o desperdício de materiais (Felisardo; Santos, 2021).

Entre os principais entraves técnicos destaca-se a falta de planejamento adequado no canteiro de obras e a ausência de métodos organizacionais que favoreçam a separação e o reaproveitamento dos resíduos. Muitas empresas do setor ainda não adotam estratégias eficientes de controle de perdas e de segregação dos materiais no local de geração, o que dificulta a reutilização posterior. De acordo com Maciel e Melhado (2020), a organização do canteiro de obras exerce papel fundamental na redução do desperdício de materiais e na melhoria do processo produtivo, sendo necessária a implementação de práticas que favoreçam o controle e o gerenciamento dos resíduos gerados.

Mendonça (2025) destaca que a gestão eficiente dos resíduos da construção civil depende de um planejamento integrado que envolva desde a etapa de projeto até a execução da obra, permitindo a identificação de oportunidades para prevenção de perdas e reaproveitamento de materiais. Além disso, existem desafios relacionados à infraestrutura e às tecnologias disponíveis para o reaproveitamento desses materiais. Em muitos casos, a ausência de equipamentos apropriados para a triagem, reciclagem ou transformação dos resíduos limita as possibilidades de reutilização nas próprias obras ou em outras aplicações.

Os entraves logísticos também representam um obstáculo significativo para a implementação dessas práticas. O transporte e a destinação dos resíduos

recicláveis muitas vezes demandam custos adicionais, além da necessidade de parcerias com empresas especializadas em reciclagem. Segundo Paulino *et al.* (2023), apesar do crescimento das iniciativas de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil, ainda existem limitações relacionadas à distribuição de usinas recicladoras e à logística de coleta e transporte desses materiais, o que dificulta sua incorporação em larga escala no setor da construção civil.

Outro fator relevante está relacionado aos aspectos normativos e à necessidade de cumprimento das legislações ambientais vigentes. Embora existam regulamentações que orientam a gestão dos resíduos da construção civil, muitas empresas encontram dificuldades para adequar suas práticas às exigências legais, seja por falta de conhecimento técnico, seja pela ausência de fiscalização mais efetiva. Souza *et al.* (2022) destacam que o cumprimento das normas ambientais e a adoção de políticas públicas voltadas para o gerenciamento adequado dos resíduos são essenciais para ampliar as práticas de reciclagem e reutilização no setor.

Dessa forma, observa-se que a efetiva implementação do reaproveitamento de resíduos na construção civil depende da superação de diferentes desafios que envolvem aspectos técnicos, logísticos e normativos. A adoção de estratégias de planejamento, a capacitação dos profissionais do setor, o fortalecimento das políticas públicas e o investimento em tecnologias de reciclagem são medidas fundamentais para promover uma gestão mais eficiente dos resíduos e incentivar práticas construtivas mais sustentáveis.

A implementação do reaproveitamento de resíduos na construção civil enfrenta diversos desafios que dificultam a adoção efetiva de práticas sustentáveis no setor. Esses obstáculos estão relacionados principalmente a fatores técnicos, logísticos e normativos, que interferem diretamente na gestão adequada dos resíduos gerados nas obras. A falta de planejamento, infraestrutura limitada para reciclagem, custos adicionais de transporte e dificuldades no cumprimento das legislações ambientais são alguns dos fatores que comprometem o avanço dessas práticas. De acordo com Felisardo e Santos (2021), apesar da crescente preocupação com a sustentabilidade, muitas empresas da construção civil ainda enfrentam dificuldades para implementar sistemas eficientes de gerenciamento de resíduos.

Nesse contexto, os principais entraves que dificultam o reaproveitamento de resíduos na construção civil podem ser organizados conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 2. Principais entraves para o reaproveitamento de resíduos na construção civil

Tipo de entrave	Descrição	Impactos no setor
Técnico	Falta de tecnologias adequadas para triagem e reciclagem de resíduos no canteiro de obras	Dificulta o reaproveitamento e aumenta o desperdício de materiais
Logístico	Custos elevados de transporte e ausência de centros de reciclagem próximos às obras	Aumenta o descarte em aterros ou locais irregulares
Organizacional	Falta de planejamento e organização no canteiro de obras	Compromete a separação e o gerenciamento adequado dos resíduos

Capacitação profissional	Falta de treinamento dos trabalhadores sobre gestão de resíduos	Reduz a eficiência das práticas de reaproveitamento
Normativo	Dificuldade de adequação às legislações ambientais e baixa fiscalização	Limita a aplicação das políticas de gestão de resíduos
Infraestrutura	Número insuficiente de usinas de reciclagem de resíduos da construção	Dificulta o processamento e reutilização dos materiais

Fonte: Souza *et al.* (2022) e Maciel e Melhado (2020).

A análise desses entraves demonstra que a implementação do reaproveitamento de resíduos na construção civil depende da superação de diferentes desafios estruturais e organizacionais. Segundo Paulino *et al.* (2023), embora o Brasil tenha avançado na reciclagem de resíduos de construção e demolição, ainda existem limitações relacionadas à infraestrutura e à logística de gestão desses materiais. Além disso, Mendonça (2025) destaca que o planejamento adequado das obras e a adoção de práticas de gestão eficientes são fundamentais para reduzir perdas e ampliar as possibilidades de reaproveitamento. Dessa forma, investir em capacitação profissional, fortalecer a fiscalização das normas ambientais e ampliar a infraestrutura de reciclagem são medidas essenciais para promover uma gestão mais sustentável dos resíduos no setor da construção civil, conforme também discutido por Souza *et al.* (2022) e Maciel e Melhado (2020).

3 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu compreender que o reaproveitamento de resíduos na construção civil representa uma alternativa viável e necessária para a redução dos impactos ambientais e econômicos gerados pelo setor. A partir da análise realizada, verificou-se que o objetivo geral foi alcançado, uma vez que foram identificados tanto os benefícios quanto os desafios relacionados à reutilização dos resíduos. Além disso, foi possível responder à problemática proposta, evidenciando que o reaproveitamento contribui significativamente para a diminuição da degradação ambiental, redução de custos nas obras e uso mais racional dos recursos naturais.

Ao longo da pesquisa, constatou-se que, apesar das vantagens, ainda existem entraves importantes que dificultam a efetiva implementação dessas práticas. Entre os principais desafios destacam-se as limitações técnicas, a falta de infraestrutura adequada, a escassez de políticas públicas mais eficazes e a baixa adesão por parte

dos profissionais da construção civil. Esses fatores demonstram que o avanço do reaproveitamento de resíduos não depende apenas de conhecimento técnico, mas também de mudanças estruturais, culturais e institucionais no setor.

Como limitação do estudo, destaca-se o fato de ter sido baseado exclusivamente em revisão bibliográfica, o que restringe a análise à interpretação de dados já existentes. Dessa forma, recomenda-se que pesquisas futuras explorem estudos de campo, com aplicação prática em obras reais, a fim de aprofundar a compreensão sobre a viabilidade e os resultados do reaproveitamento de resíduos. Sugere-se também o desenvolvimento de novas tecnologias e políticas que incentivem práticas sustentáveis, contribuindo para a consolidação de uma construção civil mais eficiente, econômica e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

- ALIMI, Kenny; JIN, Ruoyu; NGUYEN, Bao Ngoc; NGUYEN, Quan; CHEN, Weifeng; HOSKING Lee. **Exploring artificial intelligence applications in construction and demolition waste management: a review of existing literature.** Journal of Science and Transport Technology, p. 104-136, 2025.
- ARAÚJO, Raquel Salles de. **Estudo de caso do gerenciamento de resíduos da construção civil nas esferas acadêmica e industrial.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2022.
- AUGUSTO JUNIOR, José. **Caracterização e reciclagem de resíduos cerâmicos de construção civil para aplicação como adição pozolânica e como componente de clínques visando novos cimentos.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2020.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente.** Manual para gerenciamento de resíduos da construção civil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2020.
- CONAMA. Conselho Nacional Do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 136, p. 95–96, 17 jul. 2002.
- CARDOSO DE LUNA, F.; FREITAS, F. B. **Sustentabilidade em Canteiros de Obras.** Epitaya E-books, [S. l.], v. 1, n. 6, p. 311-337, 2021. DOI: 10.47879/ed.ep.2021250p311. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/178>. Acesso em: 23 set. 2025.
- CUNHA, Késia da Silva; ROBERTO, José Carlos Alves; SOUTO, Sístina Pereira; LIMA, Suelen Costa. **Resíduos sólidos na construção civil no Brasil.** Revista de Gestão e Secretariado, v. 14, n. 6, p. 8671-8692, 2023
- JACINTO, M. E. L.; CARVALHO, E. M. R. **Educação Ambiental na Construção Civil: Práticas de Gestão de Resíduos no Canteiro de Obras.** Em: SALES, R. E. D. S. et al. A Construção Civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social - Volume 2. 1. ed. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 103–118. E-book. Disponível em: <http://www.editoracientifica.com.br/articles/code/220508951>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- KABIRIFAR, K. et al. **A conceptual foundations for effective construction and demolition waste management.** Cleaner Engineering and Technology, v. 1, p. 100019, oct. 2020.
- FELISARDO, A. J. R.; SANTOS, N. G. **Aumento da geração de resíduos sólidos com a pandemia do COVID-19: desafios e perspectivas para a sustentabilidade.** Revista Meio Ambiente Brasil, v.3, n.3, p.30-36, 2021. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/138/99>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- MACIEL, L. L.; MELHADO, B. S. **Organização do canteiro de obras para produção do revestimento de argamassa.** Revista Researchgate (2020). Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Silvio-> Acesso em: 23 ago. 2025.

MENDONÇA, João Clever da Silva. **Gestão de resíduos na construção civil: prevenção de perdas em obras**. Engenharias, v. 29, n. 144, 09 mar. 2025.

Disponível em: <https://doi.org/10.69849/revistaft/pa10202503091917>. Acesso em: 23 set. 2025.

PAULINO, R. S. et al.. **Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008-2020**. Ambiente Construído, v. 23, n. 3, p. 83–97, jul. 2023.

SOUZA, F. da S. et al. **Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon**. Conservation and Recycling, v. 176, p. 105896, 2022.



Capítulo 4

MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL: FUNDAMENTOS E ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO

TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE: FUNDAMENTALS AND APPLICATION STRATEGIES

Julienne Sousa Falcao Melo¹

Ronaldo de Jesus Barros²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A crescente competitividade no setor industrial tem impulsionado as organizações a adotarem estratégias de gestão capazes de aumentar a eficiência produtiva, reduzir falhas operacionais e garantir maior confiabilidade dos processos. Nesse contexto, a Manutenção Produtiva Total (TPM – *Total Productive Maintenance*) destaca-se como uma abordagem estratégica voltada à melhoria contínua e à maximização da eficiência global dos equipamentos. O presente trabalho tem como objetivo compreender os fundamentos da TPM e analisar suas principais estratégias de aplicação no ambiente industrial, evidenciando sua contribuição para a redução de perdas produtivas e o aumento da disponibilidade dos equipamentos. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo, baseada na análise de livros, artigos científicos, dissertações e teses publicados nos últimos anos em bases acadêmicas reconhecidas. Os resultados apontam que a TPM promove uma gestão integrada da manutenção, envolvendo operadores, técnicos e gestores na prevenção de falhas e na melhoria contínua dos processos produtivos. Observou-se ainda que a aplicação estruturada de seus pilares, associada ao monitoramento de indicadores como OEE, MTBF e MTTR, contribui para elevar a confiabilidade operacional, reduzir custos e melhorar o desempenho organizacional. Conclui-se que a implementação da TPM representa uma importante estratégia para o fortalecimento da competitividade industrial, ao promover maior eficiência, qualidade e sustentabilidade nos sistemas produtivos.

Palavras-chave: Manutenção Produtiva Total; Gestão da manutenção; Eficiência produtiva; Confiabilidade operacional.

Abstract

The increasing competitiveness in the industrial sector has driven organizations to adopt management strategies capable of enhancing productive efficiency, reducing operational failures, and ensuring greater process reliability. In this context, Total Productive Maintenance (TPM) stands out as a strategic approach focused on continuous improvement and the maximization of overall equipment effectiveness. This study aims to understand the fundamentals of TPM and analyze its main application strategies in the industrial environment, highlighting its contribution to the reduction of productive losses and the increase in equipment availability. To achieve this objective, a qualitative and descriptive bibliographic research was conducted, based on the analysis of books, scientific articles, dissertations, and theses published in recent years in recognized academic databases. The results indicate that TPM promotes an integrated maintenance management system, involving operators, technicians, and managers in failure prevention and continuous improvement of production processes. It was also observed that the structured application of its pillars, combined with the monitoring of indicators such as OEE, MTBF, and MTTR, contributes to increasing operational reliability, reducing costs, and improving organizational performance. It is concluded that the implementation of TPM represents an important strategy for strengthening industrial competitiveness by promoting greater efficiency, quality, and sustainability in production systems.

Keywords: Total Productive Maintenance; Maintenance Management; Productive Efficiency; Operational Reliability.

1 INTRODUÇÃO

A crescente competitividade no setor industrial tem exigido das organizações estratégias de gestão cada vez mais eficientes, capazes de assegurar elevados níveis de produtividade, qualidade e confiabilidade dos processos. Nesse contexto, a manutenção deixou de ser vista apenas como uma atividade corretiva e passou a assumir um papel estratégico na gestão dos ativos produtivos. A busca pela redução de falhas, minimização de perdas e maximização da disponibilidade dos equipamentos tornou-se fundamental para a sustentabilidade e o desempenho organizacional.

Dentre as abordagens modernas de gestão da manutenção, destaca-se a Manutenção Produtiva Total (TPM – Total Productive Maintenance), desenvolvida no Japão como uma filosofia voltada à eficiência operacional e à melhoria contínua. Diferentemente dos modelos tradicionais, a TPM propõe a integração de todos os setores da empresa — incluindo operadores, técnicos e gestores — na responsabilidade de manter os equipamentos em condições ideais de funcionamento. Essa abordagem colaborativa visa prevenir falhas, aumentar a vida útil dos ativos e promover um ambiente organizacional mais participativo.

A TPM fundamenta-se na eliminação sistemática das perdas produtivas, no aumento da disponibilidade das máquinas e na melhoria da qualidade dos processos. Para isso, utiliza pilares como a manutenção autônoma, a manutenção planejada, a capacitação dos colaboradores, a melhoria contínua e a gestão da segurança. Esses elementos permitem uma atuação conjunta entre equipes operacionais e de manutenção, contribuindo para a redução de paradas não programadas e para o aumento da eficiência produtiva.

Entretanto, a implantação da Manutenção Produtiva Total não se limita à adoção de ferramentas técnicas, exigindo também uma significativa transformação cultural dentro das organizações. Esse processo demanda disciplina, comprometimento coletivo e a participação ativa de todos os colaboradores, tornando a TPM uma estratégia de gestão que vai além dos ganhos operacionais. Dessa forma, além de melhorar indicadores produtivos, a TPM fortalece o trabalho em equipe, o senso de pertencimento e a valorização do capital humano.

Diante desse cenário, surge o seguinte problema de pesquisa: de que maneira a aplicação dos fundamentos e estratégias da Manutenção Produtiva Total (TPM) pode contribuir para o aumento da eficiência produtiva e a redução de falhas operacionais nas organizações industriais?

Com base nessa questão, o objetivo geral deste trabalho é compreender os fundamentos da Manutenção Produtiva Total como ferramenta de gestão nas organizações industriais. Como objetivos específicos, busca-se descrever os tipos de manutenção utilizados nas indústrias, identificar os principais conceitos e pilares que fundamentam a TPM e analisar os benefícios de sua implementação na redução de falhas e perdas produtivas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica,

de caráter qualitativo e descritivo, tendo como foco os fundamentos e as estratégias de aplicação da Manutenção Produtiva Total (TPM). Esse tipo de estudo consistiu na análise de materiais já publicados sobre o tema, sem a realização de experimentos ou coleta de dados empíricos, buscando compreender e discutir as contribuições teóricas existentes.

Para a construção do referencial teórico, foram considerados artigos científicos publicados nos últimos dez anos, em português e inglês, com o objetivo de garantir a atualidade e a relevância dos trabalhos consultados. Como critérios de inclusão, foram selecionados livros, dissertações, teses e artigos que abordaram diretamente a TPM, seus pilares, fundamentos e aplicações em contextos industriais. Foram excluídos resumos, primeiras impressões e artigos de revisão já existentes, a fim de evitar redundâncias e priorizar análises mais aprofundadas e consistentes.

As buscas foram realizadas em bases de dados acadêmicas reconhecidas, tais como SciELO, Google Acadêmico, Periódicos CAPES e ScienceDirect, além de obras de referência disponíveis em bibliotecas físicas e digitais. Os descritores utilizados para a pesquisa incluíram as palavras-chave: “Manutenção Produtiva Total”, “TPM”, “gestão da manutenção”, “eficiência produtiva” e “estratégias de aplicação”. A partir desse levantamento, foi realizada a análise crítica do material encontrado, buscando integrar os diferentes enfoques teóricos e práticos relacionados ao tema.

2.2 Resultados e Discussão

A Manutenção Produtiva Total (TPM) é reconhecida como uma metodologia estratégica de gestão voltada para a maximização da eficiência operacional, assegurando simultaneamente padrões elevados de qualidade e segurança. A sua evolução reflete a transição dos sistemas tradicionais de manutenção corretiva e preventiva para modelos de gestão integrados, nos quais todos os setores da organização desempenham um papel ativo na preservação e melhoria contínua dos ativos produtivos (Carvalho; Barros, 2017).

Estruturada em pilares como manutenção autônoma, melhoria focada, manutenção planejada, gestão da qualidade, gestão inicial, educação e formação, gestão administrativa e segurança, saúde e meio ambiente, a TPM apoia-se em práticas organizacionais sistemáticas, com destaque para a metodologia 5S (Ferreira; Costa, 2022).

Um dos princípios centrais dessa abordagem é a identificação e eliminação de perdas crônicas que afetam o desempenho global dos equipamentos, como paragens inesperadas, tempos de setup prolongados, microparagens, redução de velocidade, defeitos de produção e desperdício de rendimento. A minimização dessas perdas contribui diretamente para o aumento da disponibilidade e eficiência operacional, reforçando a ligação entre manutenção e gestão da qualidade (Costa; Pereira; Lobo, 2019).

A adoção da TPM, entretanto, pode enfrentar barreiras como resistência cultural, falta de alinhamento estratégico e fragilidades na cooperação interdepartamental. Para superar esses obstáculos, é necessário garantir empenho da gestão de topo, formação contínua das equipes e um forte sistema de monitorização

de indicadores de desempenho (Carvalho; Barros, 2017).

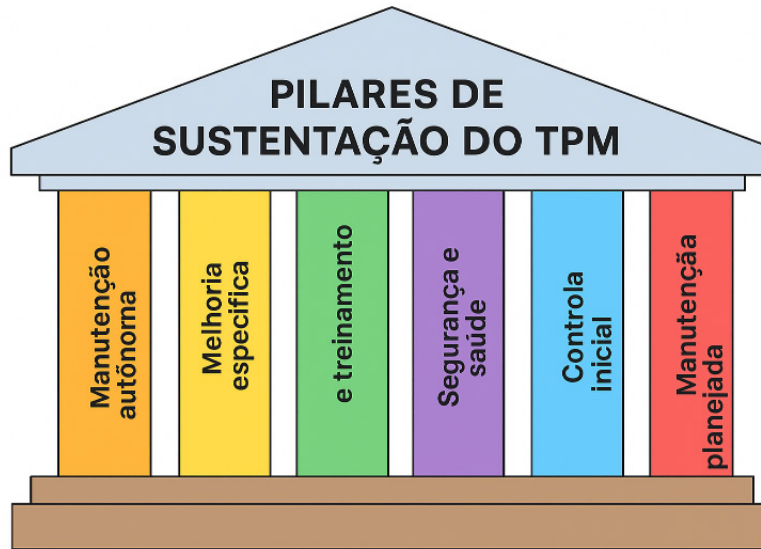


Figura 1. Pilares da TPM

Fonte: Adaptado Ferreira e Costa (2022).

Estudos de aplicação demonstram que a integração entre sistemas de manutenção e qualidade conduz a melhorias mensuráveis nos resultados operacionais, como reduções significativas nos custos associados à paragem de equipamentos e aumentos expressivos na produtividade e estabilidade do processo (Ferreira; Costa, 2022).

A crescente competitividade no ambiente industrial exige que as organizações adotem estratégias de gestão capazes de reduzir perdas, eliminar falhas e elevar a qualidade dos processos. Nesse cenário, dois sistemas contemporâneos têm se destacado como pilares da melhoria contínua: a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Gestão da Qualidade Total (TQM).

De acordo com Moura e Leal (2019), o TPM consolidou-se como um método de manutenção estratégica voltado à eliminação de falhas e maximização da eficiência por meio da participação ativa dos colaboradores. Por sua vez, a TQM busca assegurar a satisfação plena do cliente com base na padronização de rotinas e no envolvimento coletivo na tomada de decisões (Silva *et al.*, 2021).

Apesar das diferenças estruturais, os dois modelos compartilham princípios fundamentais. Segundo Carvalho e Barros (2017), tanto o TPM quanto o TQM valorizam a gestão participativa, o foco no cliente, a orientação por processos e a eliminação de falhas recorrentes. Essa convergência torna viável a aplicação integrada das duas filosofias, o que tem sido demonstrado em estudos comparativos recentes (Lima *et al.*, 2022).

A gestão da qualidade evoluiu de uma lógica reativa para um modelo estratégico de gestão organizacional. Costa *et al.* (2019) evidenciam essa transição ao demonstrar que a qualidade deixou de ser uma etapa final do processo para assumir papel norteador desde o planejamento até o pós-venda. Nesse sentido, a adoção combinada de TQM e TPM fortalece a maturidade operacional das empresas.

De acordo com Pereira e Alves (2018), o TPM tem se mostrado uma das me-

todologias mais eficazes para transformar a cultura fabril, especialmente quando integrado a programas robustos de qualidade. Complementarmente, Oliveira et al. (2021) defendem que o TQM deve ser compreendido como uma filosofia de gestão organizacional de longo prazo. Assim, a convergência entre TPM e TQM contribui não apenas para ganhos operacionais, mas também para a construção de uma cultura corporativa orientada à transparência, comunicação e aprendizado contínuo.

Outro ponto crítico é a relação entre custos de falhas e investimentos em prevenção. Souza et al. (2020) demonstram que os custos decorrentes de falhas internas e externas podem ser significativamente reduzidos por meio de estratégias preventivas de manutenção aliadas à gestão da qualidade. Isso reforça a ideia de que a integração TPM-TQM contribui diretamente para a sustentabilidade financeira das organizações.

O papel do fator humano permanece como elemento central nas duas abordagens. Fonseca e Lima (2018) enfatizam que, mesmo em ambientes altamente automatizados, o desempenho do sistema depende do engajamento e da autonomia dos operadores. Ferramentas como Análise de Causa Raiz (ACR), Ishikawa e 5WH continuam sendo amplamente utilizadas em conjunto com indicadores de performance para promover o *empowerment* operacional (Melo et al., 2020).

Esses elementos, frequentemente representados em modelos gráficos piramidais, facilitam a compreensão sistêmica da proposta. A TQM, por sua vez, mantém como núcleo operacional o ciclo PDCA, consolidado como base metodológica para práticas de padronização e controle (Figueiredo et al., 2020).

Do ponto de vista metodológico, a integração TPM-TQM tem sido investigada com base em estudos de caso aprofundados, abordagem considerada adequada para análise de fenômenos complexos (Rodrigues et al., 2019). Modelos analíticos recentes, como o proposto por Ferreira e Costa (2022), podem ser utilizados como referência em pesquisas aplicadas à engenharia de produção.

Apesar das evidências positivas, a adoção conjunta de TPM e TQM ainda enfrenta desafios relacionados à cultura organizacional, à priorização de investimentos e ao alinhamento estratégico entre setores. Santos et al. (2023) destacam que a demora na percepção dos resultados pode gerar resistência à implementação completa das práticas de qualidade.

A Manutenção Produtiva Total (TPM) baseia-se no monitoramento contínuo de indicadores específicos para avaliar a eficiência dos equipamentos e a eficácia das ações de manutenção. É necessário coletar dados precisos ao longo do tempo em cada posto de trabalho, permitindo identificar falhas, perdas e oportunidades de melhoria (Rodrigues; Gomes; Araujo, 2019).

Indicadores clássicos de confiabilidade incluem MTTR (*Mean Time to Repair*), MTTF (*Mean Time to Failure*) e MTBF (*Mean Time Between Failures*). O MTTR mede o tempo médio de reparo após falhas, o MTTF indica o tempo médio até falhas irreparáveis, e o MTBF, a soma de MTTR e MTTF, mostra o intervalo médio entre falhas reparáveis. Esses indicadores são essenciais para avaliar a eficiência da manutenção e a confiabilidade operacional dos equipamentos (Santos; Brito; Machado, 2023).

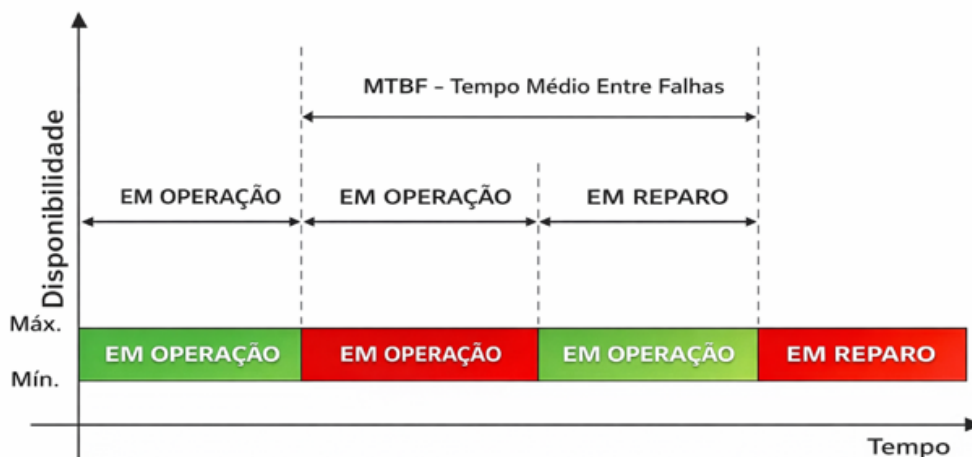


Figura 2. Aplicação do MTBF.

Fonte: Adaptado Costa *et al.* (2019).

O OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) é o principal indicador da TPM, calculado pela multiplicação de Disponibilidade, Performance e Qualidade. Representa a porcentagem de tempo realmente produtivo em relação ao tempo planejado de produção, considerando todas as perdas. O objetivo ideal é atingir 85% de OEE, com alta disponibilidade, performance e qualidade, mas cada empresa deve definir suas próprias metas (Santos; Ribeiro, 2018).

TPM busca reduzir falhas e aumentar o MTBF, tornando os equipamentos mais confiáveis. O uso integrado de OEE, MTTR, MTTF e MTBF permite diagnosticar gargalos, definir manutenção preventiva e medir a eficácia de ações corretivas. Quando aplicados corretamente, formam um sistema robusto de monitoramento que contribui para a melhoria contínua, aumento da produtividade e redução de custos operacionais (Rodrigues; Gomes; Araujo, 2019).

De acordo com Santos e Ribeiro (2018), a filosofia TPM vai além da manutenção corretiva, adotando um enfoque preventivo estruturado em pilares como manutenção autônoma, melhoria focada, capacitação contínua, segurança e manutenção planejada.

A Manutenção Produtiva Total (TPM) consolidou-se como uma das principais estratégias de gestão industrial orientadas à maximização da eficiência global dos equipamentos e à eliminação sistemática de perdas produtivas. Diferentemente da manutenção tradicional, que atua de forma reativa, a TPM assume caráter preventivo e estratégico, alinhando manutenção, produção e qualidade dentro de um mesmo sistema organizacional (Moura; Leal, 2019).

A Eficiência Global do Equipamento (OEE) é um indicador central no gerenciamento da produção, permitindo avaliar a eficácia das máquinas em termos de disponibilidade, desempenho e qualidade (Lima; Souza; Castro, 2022). Essa métrica complementa o TPM, proporcionando uma visão quantitativa sobre perdas e oportunidades de melhoria na linha de produção. O OEE ajuda a identificar gargalos operacionais e a priorizar ações corretivas, apoiando estratégias de manutenção preditiva e preventiva (Fonseca; Lima, 2018).

A primeira dimensão do OEE, a disponibilidade, considera o tempo efetivamente produtivo das máquinas em relação ao tempo planejado (Figueiredo;

Monteiro; Dias, 2020). Interrupções não planejadas, falhas e ajustes são contabilizados nessa medida, permitindo um diagnóstico preciso sobre a confiabilidade dos equipamentos. A gestão adequada desse fator garante maior utilização dos ativos e reduz perdas produtivas.

O segundo fator, o desempenho, avalia se as máquinas operam na velocidade ideal durante o tempo produtivo, refletindo a eficiência operacional (Lima; Souza; Castro, 2022). Reduções de velocidade ou paradas curtas impactam diretamente no OEE, destacando a importância do monitoramento contínuo e da capacitação dos operadores. O desempenho elevado é resultado da integração entre processos, treinamento e manutenção preventiva.

A qualidade mede a proporção de produtos que atendem aos padrões de especificação sem necessidade de retrabalho (Fonseca; Lima, 2018). Defeitos ou rejeições afetam negativamente o OEE e evidenciam pontos críticos nos processos de produção. A análise combinada de disponibilidade, desempenho e qualidade permite que o OEE seja um guia estratégico, promovendo melhorias contínuas e sustentáveis nas operações industriais (Figueiredo; Monteiro; Dias, 2020).

Os resultados observados na literatura indicam que empresas que adotam a TPM de forma estruturada apresentam melhorias expressivas na disponibilidade dos equipamentos, redução de falhas crônicas e aumento da confiabilidade operacional. Carvalho e Barros (2017) evidenciam que a integração entre manutenção e qualidade gera impactos diretos na estabilidade do processo produtivo, diminuindo variabilidades e retrabalhos.

Esses pilares — manutenção autônoma, manutenção planejada, melhoria focada, gestão da qualidade, gestão inicial, educação e treinamento, segurança e meio ambiente e gestão administrativa — constituem a base da filosofia TPM. Segundo Ferreira e Costa (2022), a aplicação integrada desses elementos permite que a organização evolua de um modelo corretivo para um sistema de prevenção estruturada de falhas.

Um dos principais resultados associados à implementação da TPM é a redução das chamadas “seis grandes perdas”: falhas de equipamento, setup e ajustes, pequenas paradas, redução de velocidade, defeitos e retrabalho, e perdas de rendimento. Costa, Pereira e Lobo (2019) destacam que a eliminação dessas perdas está diretamente relacionada ao aumento do indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), considerado o principal parâmetro de desempenho da TPM.

Rodrigues, Gomes e Araujo (2019) demonstram que o aumento do MTBF aliado à redução do MTTR representa ganho efetivo na confiabilidade operacional. Esse resultado confirma que a TPM não apenas reduz falhas, mas também melhora a capacidade de resposta do sistema produtivo.

Outro aspecto relevante identificado na literatura refere-se à integração entre TPM e Gestão da Qualidade Total (TQM). Moura e Leal (2019) argumentam que ambas compartilham fundamentos como participação coletiva, melhoria contínua e foco em processos. Lima et al. (2022) verificaram, em estudo comparativo no setor automotivo, que empresas que integraram TPM e TQM apresentaram maior estabilidade de produção e redução significativa de desperdícios quando comparadas àquelas que adotaram apenas uma das metodologias.

Contudo, os resultados positivos não são automáticos. Santos, Brito e Machado (2023) identificaram que barreiras culturais, resistência à mudança e falta

de comprometimento da alta gestão são fatores críticos que podem comprometer a consolidação da TPM. Isso evidencia que sua implementação exige transformação cultural, e não apenas aplicação técnica de ferramentas.

Do ponto de vista econômico, Souza, Pinto e Carvalho (2020) demonstram que a prevenção sistemática de falhas reduz custos associados a paradas não programadas, retrabalhos e perdas de matéria-prima. Assim, a TPM contribui não apenas para eficiência produtiva, mas também para sustentabilidade financeira organizacional.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho permitiu compreender a relevância da Manutenção Produtiva Total (TPM) como uma estratégia de gestão voltada à melhoria da eficiência operacional nas organizações industriais. O objetivo geral de compreender os fundamentos da TPM e sua contribuição para a redução de falhas e perdas produtivas foi alcançado por meio da revisão da literatura especializada.

A partir da discussão teórica, foi possível identificar que a TPM se diferencia dos modelos tradicionais de manutenção por promover uma abordagem integrada, envolvendo todos os níveis da organização na preservação e melhoria dos ativos produtivos. Dessa forma, a manutenção passa a assumir um papel estratégico dentro das empresas, contribuindo para a confiabilidade dos processos e para a melhoria do desempenho produtivo.

Em relação ao problema de pesquisa, que buscou compreender de que maneira a aplicação da TPM pode contribuir para o aumento da eficiência produtiva e para a redução de falhas operacionais, observou-se que sua implementação favorece a identificação e eliminação sistemática de perdas relacionadas ao funcionamento dos equipamentos.

A atuação conjunta entre operadores, equipes de manutenção e gestores, aliada ao monitoramento de indicadores de desempenho, fortalece a cultura de prevenção de falhas e de melhoria contínua. Assim, a TPM não apenas melhora a disponibilidade das máquinas, mas também contribui para o aumento da qualidade dos processos produtivos e para a redução de custos associados a paradas não programadas.

Apesar dos benefícios identificados, a literatura também aponta algumas limitações relacionadas à implementação dessa filosofia nas organizações. Entre os principais desafios estão a resistência à mudança, a necessidade de transformação cultural e o comprometimento contínuo da gestão e das equipes envolvidas. Tais fatores podem dificultar a consolidação da TPM quando não há alinhamento estratégico ou investimento adequado em capacitação e comunicação interna.

Nesse sentido, recomenda-se que futuras pesquisas aprofundem a análise da aplicação prática da TPM em diferentes setores industriais, especialmente por meio de estudos de caso e investigações empíricas que permitam avaliar seus impactos em contextos organizacionais específicos. Dessa forma, será possível ampliar o entendimento sobre os desafios e as potencialidades dessa metodologia na gestão moderna da manutenção.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, L.; BARROS, P. **Integrated quality and maintenance systems in industrial operations.** *journal of production systems*, v. 12, n. 3, p. 45–59, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/jps.2017.12345>. Acesso em: 4 out. 2025.
- COSTA, V.; PEREIRA, J.; LOBO, A. **Evolution of quality management from inspection to strategic governance.** *brazilian journal of industrial engineering*, v. 8, n. 1, p. 60–78, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/bjie.2019.08160>. Acesso em: 1 out. 2025.
- FERREIRA, M.; COSTA, R. **Analytical framework for TPM–TQM integration in manufacturing plants.** *applied engineering research*, v. 15, n. 2, p. 112–128, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/aer.2022.152112>. Acesso em: 14 out. 2025.
- FIGUEIREDO, H.; MONTEIRO, R.; DIAS, L. **PDCA applications in modern quality systems.** *operations & improvement review*, v. 9, n. 4, p. 27–39, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/oir.2020.09427>. Acesso em: 9 out. 2025.
- FONSECA, P.; LIMA, D. **Empowerment and human reliability in industrial maintenance.** *human factors in engineering*, v. 7, n. 2, p. 33–51, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/hfe.2018.07233>. Acesso em: 14 out. 2025.
- LIMA, F.; SOUZA, B.; CASTRO, G. **Comparative analysis of TPM and TQM in automotive industries.** *international journal of lean systems*, v. 5, n. 1, p. 19–34, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/ijls.2022.05119>. Acesso em: 14 out. 2025.
- MELO, A.; FERREIRA, P.; SANTOS, R. **Root cause analysis tools in lean maintenance systems.** *reliability & process control*, v. 13, n. 1, p. 55–68, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/rpc.2020.13155>. Acesso em: 14 out. 2025.
- MOURA, E.; LEAL, A. **Strategic TPM implementation and cultural change.** *journal of maintenance engineering*, v. 16, n. 1, p. 21–38, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/jme.2019.16121>. Acesso em: 15 out. 2025.
- OLIVEIRA, J.; SILVA, M.; ROCHA, R. **TQM as a corporate governance model for continuous improvement.** *Quality & Strategy Journal*, v. 10, n. 1, p. 80–99, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/qsj.2021.10180>. Acesso em: 08 out. 2025.
- PEREIRA, S.; ALVES, M. **Transformative effects of TPM on industrial culture.** *brazilian journal of industrial technology*, v. 14, n. 3, p. 101–117, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/bjit.2018.143101>. Acesso em: 4 out. 2025.
- RODRIGUES, T.; GOMES, J.; ARAUJO, R. **Case study methodology in industrial quality research.** *research methods in engineering*, v. 6, n. 2, p. 41–54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/rme.2019.06241>. Acesso em: 7 out. 2025.
- SANTOS, V.; RIBEIRO, A. **Pillars and performance indicators of TPM 4.0.** *modern manufacturing review*, v. 11, n. 2, p. 67–83, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/mmr.2018.11267>. Acesso em: 14 out. 2025.
- SANTOS, W.; BRITO, L.; MACHADO, D. **Barriers to integration of quality and maintenance systems in Brazilian industries.** *production & sustainability insights*, v. 12, n. 1, p. 15–29, 2023.
- SILVA, T.; ROCHA, D.; MENDES, P. **Customer-centric TQM approaches in service and manufacturing sectors.** *global quality journal*, v. 18, n. 2, p. 90–109, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/gqj.2021.18290>. Acesso em: 10 out. 2025.
- SOUZA, A.; PINTO, R.; CARVALHO, F. **Cost reduction through preventive quality systems.** *financial engineering in industry*, v. 9, n. 3, p. 50–64, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1000/fei.2020.09350>. Acesso em: 5 out. 2025.



Capítulo 5

GESTÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

STRATEGIC MANAGEMENT OF INDUSTRIAL MAINTENANCE IN THE ERA OF INDUSTRY 4.0: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Idaylis Placida Lindoso¹

Ronaldo de Jesus Barros²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A manutenção industrial tem assumido um papel estratégico nas organizações contemporâneas, especialmente diante do avanço da Indústria 4.0 e da crescente complexidade dos sistemas produtivos. Nesse contexto, as práticas tradicionais de manutenção vêm sendo progressivamente substituídas por abordagens mais avançadas, baseadas na integração de tecnologias digitais, como Internet das Coisas, Big Data, computação em nuvem, aprendizado de máquina e inteligência artificial. O presente estudo tem como objetivo analisar como a gestão estratégica da manutenção industrial tem sido impactada pelas tecnologias da Indústria 4.0, com ênfase na evolução das estratégias de manutenção corretiva, preventiva, preditiva e prescritiva. Para isso, realizou-se uma pesquisa de natureza qualitativa, descritiva e bibliográfica, fundamentada em uma revisão sistemática da literatura científica publicada entre 2015 e 2025, em bases de dados nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam que a incorporação de tecnologias digitais tem promovido uma transformação significativa na gestão da manutenção, tornando-a mais proativa, integrada e orientada por dados. Observa-se que a manutenção prescritiva se consolida como uma estratégia capaz de aumentar a confiabilidade dos ativos, reduzir custos operacionais e apoiar a tomada de decisão estratégica.

Palavras-chave: Gestão da manutenção; Indústria 4.0; Manutenção preditiva. Manutenção prescritiva.

Abstract

Industrial maintenance has assumed a strategic role in contemporary organizations, especially in light of the advancement of Industry 4.0 and the increasing complexity of production systems. In this context, traditional maintenance practices have been progressively replaced by more advanced approaches based on the integration of digital technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data, cloud computing, machine learning, and artificial intelligence. This study aims to analyze how the strategic management of industrial maintenance has been impacted by Industry 4.0 technologies, with emphasis on the evolution of corrective, preventive, predictive, and prescriptive maintenance strategies. To achieve this objective, a qualitative, descriptive, and bibliographic research approach was adopted, based on a systematic review of scientific literature published between 2015 and 2025 in both national and international databases. The results demonstrate that the incorporation of digital technologies has promoted a significant transformation in maintenance management, making it more proactive, integrated, and data-driven. Furthermore, prescriptive maintenance has emerged as a strategic approach capable of increasing asset reliability, reducing operational costs, and supporting strategic decision-making processes.

Keywords: Maintenance management; Industry 4.0; Predictive maintenance; Prescriptive maintenance.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção industrial tem assumido um papel cada vez mais estratégico nas organizações contemporâneas, especialmente em um cenário marcado pela crescente complexidade dos sistemas produtivos e pela intensificação da competitividade global.

Tradicionalmente associada a ações corretivas ou preventivas, a manutenção passou a ser compreendida como um elemento essencial para a confiabilidade operacional, a segurança dos processos e a sustentabilidade econômica das empresas. Nesse contexto, sua gestão deixou de ter um caráter meramente operacional para integrar-se às decisões estratégicas organizacionais.

Com o advento da Indústria 4.0, esse processo de transformação tornou-se ainda mais evidente. A incorporação de tecnologias digitais avançadas, como sensores inteligentes, sistemas ciberfísicos, internet das coisas (IoT), redes de comunicação industrial e algoritmos de aprendizado de máquina, tem possibilitado a coleta e análise de grandes volumes de dados em tempo real.

Nesse novo ambiente tecnológico, os modelos tradicionais de manutenção corretiva e preventiva vêm sendo progressivamente complementados ou substituídos por abordagens mais avançadas, como a manutenção preditiva e a manutenção prescritiva. Essas estratégias utilizam análises estatísticas e técnicas de inteligência artificial para prever o comportamento dos equipamentos e recomendar ações específicas antes que ocorram falhas, contribuindo para a redução de custos operacionais, o aumento da disponibilidade dos ativos e a melhoria da confiabilidade dos processos produtivos.

Apesar dos benefícios associados a essas transformações, a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 na gestão da manutenção também impõe desafios relevantes às organizações. Entre eles, destacam-se a necessidade de investimentos em infraestrutura tecnológica, a qualificação e capacitação de profissionais, a reestruturação de processos internos e a integração entre sistemas físicos e digitais.

Diante desse cenário, emerge o seguinte problema de pesquisa: como a gestão estratégica da manutenção industrial tem sido redesenhada na era da Indústria 4.0? A resposta a essa questão é fundamental para compreender de que forma as organizações estão incorporando tecnologias digitais às suas estratégias de manutenção e quais impactos essas transformações têm gerado em termos de desempenho, eficiência e competitividade.

O objetivo geral deste estudo foi analisar como a gestão estratégica da manutenção industrial foi impactada pelas tecnologias da Indústria 4.0. De forma específica, buscou-se compreender as principais mudanças promovidas por esse novo paradigma tecnológico na gestão da manutenção, bem como identificar os benefícios e os desafios relacionados à adoção de estratégias de manutenção preditiva e prescritiva, a partir de uma revisão sistemática da literatura científica sobre o tema.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A pesquisa desenvolvida foi de natureza qualitativa, descritiva e bibliográfica, tendo como objetivo reunir e analisar estudos científicos previamente publicados sobre a gestão estratégica da manutenção industrial no contexto da Indústria 4.0. A revisão bibliográfica possibilitou o aprofundamento teórico do tema por meio da seleção e análise de materiais que abordaram conceitos, aplicações e desafios relacionados à manutenção preditiva e prescritiva.

Foram selecionadas publicações referentes ao período dos últimos dez anos, compreendido entre 2015 e 2025, com ênfase em artigos científicos, livros acadêmicos, dissertações e teses. Os critérios de inclusão consideraram textos disponibilizados nos idiomas português e inglês, que abordaram diretamente os temas manutenção industrial, Indústria 4.0 e tecnologias associadas. Foram excluídos resumos simples, artigos de opinião, textos sem revisão por pares, primeiras impressões, repositórios não científicos e publicações duplicadas.

As buscas foram realizadas em bases de dados reconhecidas, como Google Acadêmico, *Scopus*, *SciELO* e *ScienceDirect*, além de catálogos de bibliotecas universitárias. As palavras-chave utilizadas durante a pesquisa incluíram “manutenção industrial”, “Indústria 4.0” e “manutenção preditiva”. As obras de autores como Freitas (2016), Machado *et al.* (2023) e Nunes, Morais e Sardinha (2021) foram adotadas como referências teóricas para fundamentar e orientar a análise do material selecionado.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Contexto Histórico da manutenção industrial

A evolução da manutenção industrial pode ser compreendida em diferentes fases, de acordo com o desenvolvimento tecnológico e produtivo. Conforme Freitas (2016), a primeira geração foi marcada pela manutenção corretiva, caracterizada por ações simples de reparo somente após a falha do equipamento.

Freitas (2016) evidenciava a importância de estruturar planos de manutenção preventiva e preditiva em pequenas e médias empresas, ressaltando os ganhos de confiabilidade e redução de custos. Com a chegada da Indústria 4.0, tais conceitos foram ampliados por meio do uso de tecnologias inteligentes, permitindo maior integração entre máquinas, sistemas e gestores.

Nesse período, a baixa mecanização e a simplicidade dos processos faziam com que a prioridade não fosse a produtividade, mas sim a continuidade mínima das operações. Segundo Freitas (2016) a manutenção pode ser dividida em 4 gerações assim como as revoluções industriais, conforme ilustra a figura 1 abaixo.

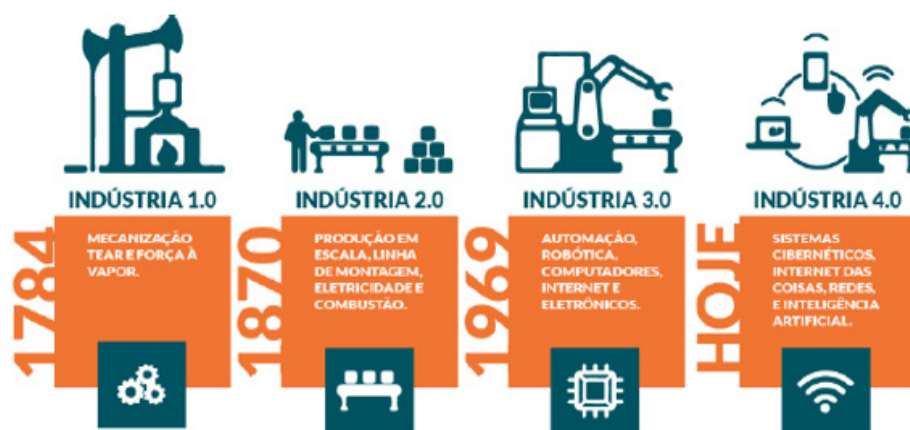


Figura 1. Revoluções Industriais

Fonte: Adaptado Freitas (2016).

De acordo com Almeida e Fabro (2019), o avanço da mecanização no período pós-guerra aumentou a necessidade de confiabilidade nos sistemas produtivos. Nesse cenário, surgiu a manutenção preventiva, realizada em intervalos programados, ainda que gerasse custos mais altos. Essa prática possibilitou maior controle sobre o desempenho dos equipamentos e consolidou os sistemas de planejamento e controle como ferramentas estratégicas para as indústrias.

Conforme Camillo (2021), a terceira geração, que começou na década de 1970, foi impulsionada pelo sistema Just-in-Time, que reduziu os estoques e intensificou os impactos das falhas produtivas. Nesse contexto, houve a adoção da manutenção preditiva, apoiada pelo uso da informática, além de maior atenção à segurança e ao meio ambiente.

De acordo com Agostino *et al.* (2020), a quarta geração, iniciada nos anos 1990, consolidou a confiabilidade como objetivo principal da manutenção. Houve uma ampliação no uso de métodos preditivos, análise de falhas e monitoramento contínuo, reduzindo a dependência da manutenção preventiva tradicional.

Conforme Machado *et al.* (2023), essa transição transformou a manutenção de uma atividade reativa para uma abordagem estratégica, voltada à prevenção e à antecipação de falhas. Essa mudança proporcionou redução de custos, aumento da produtividade e maior confiabilidade dos sistemas.

De acordo com Machado *et al.* (2023), no cenário atual da Indústria 4.0, a manutenção prescritiva se apresenta como evolução das práticas anteriores. Baseada em tecnologias digitais e inteligência artificial, ela permite não apenas prever falhas, mas também indicar ações corretivas em tempo real. Essa abordagem garante maior eficiência, confiabilidade e integração com os processos produtivos, consolidando a manutenção como fator estratégico nas organizações modernas.

2.2.2 Princípios e conceitos-chave das manutenções

A Indústria 4.0 representa a consolidação de um novo paradigma industrial baseado na integração entre sistemas físicos e digitais, promovendo maior conectividade, automação e inteligência nos processos produtivos. Esse modelo produtivo está diretamente associado à digitalização da indústria e à utiliza-

ção intensiva de tecnologias da informação e comunicação, redefinindo a forma como bens e serviços são concebidos, produzidos e gerenciados (Schwab, 2016).

Nesse contexto, os sistemas ciberfísicos assumem papel central ao integrar máquinas, dispositivos, sensores e sistemas computacionais em redes inteligentes. Esses sistemas permitem a troca contínua de informações, a tomada de decisão descentralizada e o controle autônomo dos processos produtivos, ampliando a eficiência operacional e a capacidade de adaptação das organizações industriais (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

A Internet das Coisas configura-se como um dos principais habilitadores da Indústria 4.0, possibilitando a interconexão de objetos físicos a plataformas digitais. Por meio dessa tecnologia, dados são coletados, transmitidos e processados em tempo real, permitindo maior visibilidade dos processos produtivos e suporte à tomada de decisão estratégica (Schwab, 2016).

A convergência entre sensores, atuadores, controladores avançados e sistemas computacionais resulta na fusão entre o mundo físico e o virtual. Essa integração impacta diretamente a produtividade, a qualidade e a competitividade industrial, exigindo a reconfiguração dos modelos tradicionais de gestão, incluindo as práticas de manutenção de ativos (Carvalho *et al.*, 2019).

2.2.3 Manutenção Corretiva e Preventiva

A primeira geração da manutenção industrial caracteriza-se pela predominância da manutenção corretiva, na qual as intervenções ocorriam apenas após a falha do equipamento. Essa abordagem foi amplamente utilizada nos estágios iniciais da industrialização, quando os sistemas produtivos apresentavam menor complexidade tecnológica (Wireman, 2017).

Com o avanço tecnológico e o aumento da mecanização, tornou-se evidente que a manutenção corretiva resultava em elevados custos, longos períodos de indisponibilidade e riscos à segurança operacional. Esse cenário impulsionou a busca por estratégias que reduzissem falhas inesperadas e garantissem maior continuidade da produção (Moble, 2020).

A manutenção preventiva surge como resposta a essas limitações, baseando-se na realização de inspeções, ajustes e substituições programadas em intervalos regulares. Essa abordagem tinha como objetivo evitar a degradação progressiva dos equipamentos e assegurar níveis mínimos de confiabilidade e desempenho (Kans; Ingwald, 2016).

Apesar de representar um avanço significativo, a manutenção preventiva apresentava limitações relacionadas à sua eficiência econômica. A realização de intervenções independentemente da real condição do equipamento frequentemente resultava em manutenções desnecessárias, aumento de custos e desperdício de recursos (Wireman, 2017).

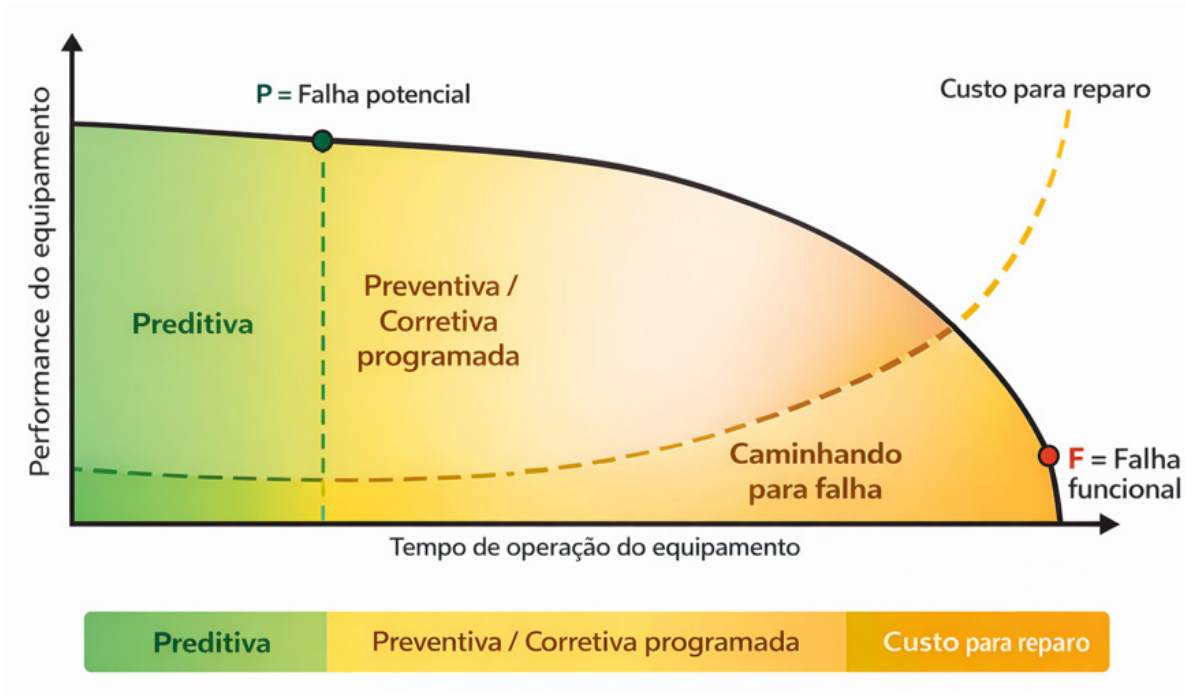


Figura 2. Etapas da Manutenção

Fonte: Adaptado Freitas (2016).

2.2.4 Manutenção Baseada Na Condição

A segunda geração da manutenção industrial é marcada pela introdução da manutenção baseada na condição, que passou a considerar o estado real dos equipamentos como critério para intervenção. Essa abordagem ganhou destaque a partir da segunda metade do século XX, acompanhando o avanço dos sistemas de medição e monitoramento (Carvalho *et al.*, 2019).

O monitoramento contínuo de parâmetros operacionais, como vibração, temperatura e pressão, permitiu identificar sinais de degradação antes da ocorrência de falhas funcionais. Dessa forma, as intervenções passaram a ser realizadas apenas quando indicadores específicos apontavam a necessidade de manutenção (Mobley, 2020).

Essa estratégia proporcionou uma redução significativa do tempo de inatividade não planejado, além de maior controle sobre os custos de manutenção. Ao alinhar as intervenções às reais condições dos ativos, tornou-se possível otimizar recursos e aumentar a confiabilidade dos sistemas produtivos (Kans; Ingwald, 2016).

Entretanto, a manutenção baseada na condição ainda dependia fortemente da interpretação humana dos dados coletados. A ausência de ferramentas analíticas avançadas limitava a capacidade de prever falhas com maior precisão, abrindo espaço para o desenvolvimento de abordagens mais sofisticadas (Wireman, 2017).

2.2.5 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva consolida-se como a terceira geração das práticas de manutenção, impulsionada pelo avanço de sensores, sistemas de aquisição de dados e técnicas de análise computacional. Essa abordagem permite antecipar falhas por meio da identificação de padrões de comportamento anormais nos equipamentos (Lee *et al.*, 2018).

A coleta contínua de dados em tempo real possibilita análises mais precisas sobre o desempenho dos ativos. Com base nessas informações, as intervenções podem ser planejadas de forma estratégica, reduzindo paradas inesperadas e aumentando a disponibilidade dos sistemas produtivos (Zhang *et al.*, 2019).

Além da redução de custos operacionais, a manutenção preditiva contribui para a extensão da vida útil dos componentes e para o aumento da confiabilidade dos ativos. Essa abordagem promove intervenções no momento ideal, evitando tanto falhas catastróficas quanto manutenções prematuras (Mobley, 2020).

A adoção da manutenção preditiva representa um passo fundamental rumo à Indústria 4.0, uma vez que integra monitoramento inteligente, análise de dados e suporte à decisão. Esse modelo estabelece as bases para a automação avançada das práticas de manutenção (Carvalho *et al.*, 2019).

2.2.6 Manutenção prescrição

A quarta geração da manutenção industrial emerge a partir da integração entre manutenção preditiva, inteligência artificial e sistemas ciberfísicos. Essa abordagem visa a criação de sistemas capazes de analisar dados, aprender com o histórico operacional e tomar decisões de forma autônoma (Zhong *et al.*, 2017).

A utilização de algoritmos de aprendizado de máquina permite identificar padrões complexos e prever falhas com maior precisão. Dessa forma, os equipamentos tornam-se capazes de realizar autoavaliações contínuas, reduzindo a dependência da intervenção humana nos processos de manutenção (Carvalho *et al.*, 2019).

A manutenção autônoma também possibilita o agendamento automático de intervenções e, em determinados casos, a execução de ações corretivas sem a necessidade de paralisação completa do sistema. Isso contribui para maior eficiência operacional e redução de custos associados a falhas (Lee *et al.*, 2018).

Esse modelo de manutenção está diretamente alinhado aos princípios da Indústria 4.0, como descentralização, adaptação em tempo real e interoperabilidade. Sua adoção representa um avanço significativo na gestão de ativos industriais, promovendo maior confiabilidade, flexibilidade e competitividade (Schwab, 2016).

A gestão da manutenção industrial caracteriza-se pela integração de diferentes estratégias, aplicadas de forma seletiva conforme as características e a criticidade de cada equipamento. Esse cenário é viabilizado pelos avanços tecnológicos e pelo desenvolvimento contínuo de ferramentas digitais, que permitem maior precisão no diagnóstico, no planejamento e na tomada de decisão, favorecendo a consolidação da manutenção prescritiva (Stradioto; Frazzon, 2023).

O conceito de prescrição, aplicado à manutenção, refere-se à capacidade de estabelecer de forma clara e fundamentada as ações mais adequadas para prevenir e mitigar falhas. Diferentemente da manutenção preditiva, que se limita à antecipação de eventos indesejáveis, a manutenção prescritiva propõe soluções concretas, indicando quais intervenções devem ser realizadas, quando executá-las e quais consequências podem ser esperadas (Schwab, 2016).

2.3 Ferramentas tecnológicas aplicada a indústria 4.0

A fábrica inteligente é caracterizada pelo uso da máxima eficiência, em que máquinas interligadas colaboram entre si, com os trabalhadores, fornecedores e clientes, além de estarem conectadas a cadeias analíticas e dinâmicas capazes de realizar autocontrole.

Nesse contexto, diversas tecnologias emergentes têm aplicabilidade direta na nova revolução industrial voltada à gestão da manutenção, entre as quais se destacam a Realidade Aumentada (RA), a Nuvem de Dados (Cloud), a Internet das Coisas (IoT) e o Big Data (Agostinho *et al.*, 2020). A Figura 3 ilustra as mudanças que podem ser ocasionadas pela inserção dessas tecnologias no ambiente industrial.



Figura 3. Tecnologias no ambiente industrial

Fonte: Adaptado Freitas (2016).

Na Indústria 4.0, a manutenção preditiva assume um papel estratégico. Os equipamentos e sistemas fabris tornam-se inteligentes, capazes de fornecer, em tempo real, informações sobre seu desempenho e necessidades de manutenção, possibilitando decisões mais rápidas e precisas pelos gestores (Camillo, 2021; Freitas, 2016).

A sensorização constitui a etapa inicial do processo de implementação da manutenção prescritiva no contexto da Indústria 4.0, sendo responsável pela coleta sistemática de dados operacionais dos ativos industriais. Essa fase envolve a instalação de sensores capazes de medir grandezas físicas relevantes, como temperatura, vibração, pressão, umidade e corrente elétrica, permitindo o monitoramento contínuo do desempenho dos equipamentos (Almeida; Fabro, 2019;

Pinto; Rezende, 2020).

A escolha adequada dos sensores está diretamente relacionada ao tipo de processo produtivo e aos modos de falha mais recorrentes dos ativos. Conforme Arriello (2018), uma estratégia eficiente de gestão da manutenção deve considerar critérios técnicos e operacionais para garantir que os dados coletados sejam confiáveis e representativos das condições reais de operação.

Os sensores atuam como elementos fundamentais para a detecção precoce de anomalias, funcionando como os “olhos e ouvidos” dos sistemas produtivos. Essa capacidade de monitoramento contínuo possibilita a identificação de desvios de comportamento antes que ocorram falhas críticas, reduzindo paradas não planejadas e aumentando a confiabilidade dos ativos (Beltrame; Andrade; Gonçalves, 2022).

Dessa forma, a sensorização estabelece a base para as etapas subsequentes da manutenção baseada em dados. Sem uma coleta estruturada e precisa, torna-se inviável a aplicação de técnicas avançadas de análise, comprometendo o uso eficaz de ferramentas digitais associadas à Indústria 4.0 (Rodrigues *et al.*, 2023).

2.3.1 Internet das Coisas (Internet of Things – IoT)

A Internet das Coisas (IoT) é responsável por conectar os sensores aos sistemas computacionais por meio da internet, permitindo a comunicação contínua entre dispositivos físicos e plataformas digitais. Essa tecnologia viabiliza a transmissão automática dos dados coletados, integrando o ambiente produtivo ao meio digital de forma inteligente (Schmidt *et al.*, 2023).

Por meio da IoT, torna-se possível a coleta e o compartilhamento de dados em tempo real, possibilitando o monitoramento remoto dos ativos industriais. Essa conectividade amplia a visibilidade dos processos produtivos e favorece a tomada de decisão baseada em informações atualizadas, independentemente da localização física da planta industrial (Stradioto; Frazzon, 2023).

A implementação da IoT requer a configuração de redes de comunicação robustas, considerando aspectos como segurança da informação, protocolos industriais e escalabilidade. Segundo Pinto e Rezende (2020), a confiabilidade da transmissão de dados é essencial para garantir a integridade das informações utilizadas nos sistemas de manutenção avançada.

A IoT atua como um elo entre a coleta de dados e as plataformas de processamento, assegurando que as informações geradas pela sensorização estejam disponíveis de forma contínua e estruturada. Essa integração é indispensável para viabilizar análises avançadas e sustentar estratégias de manutenção prescritiva (Almeida; Fabro, 2019).

2.3.2 Big Data

O Big Data refere-se ao conjunto de tecnologias e métodos destinados ao tratamento e à análise de grandes volumes de dados caracterizados pelo alto volume, velocidade e variedade. No contexto industrial, essas características tor-

nam-se evidentes devido à coleta massiva de dados proveniente de sensores e sistemas IoT (Camillo, 2021).

A principal função do Big Data é permitir o armazenamento e o processamento eficiente dessas informações, utilizando técnicas estatísticas e computacionais avançadas. De acordo com Fischer *et al.* (2022), a análise adequada dos dados possibilita a identificação de padrões de falha e tendências operacionais relevantes para a gestão da manutenção.

Na manutenção prescritiva, o Big Data transforma dados brutos em informações acionáveis, permitindo análises históricas detalhadas do comportamento dos ativos. Esse processo contribui para a compreensão das condições operacionais e para a antecipação de problemas que poderiam comprometer a produtividade industrial (Rodrigues *et al.*, 2023).

Portanto, o Big Data atua como uma ponte entre a coleta de dados e os sistemas inteligentes de decisão. Sem essa etapa intermediária, os dados permaneceriam fragmentados e subutilizados, dificultando a aplicação eficaz de técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial (Machado *et al.*, 2023).

Os servidores em nuvem, conhecidos como cloud servers, desempenham um papel essencial no armazenamento e gerenciamento dos grandes volumes de dados gerados pelas etapas anteriores. Trata-se de ambientes virtualizados que permitem o acesso remoto às informações de forma segura, escalável e eficiente (Agostino *et al.*, 2020).

Uma das principais vantagens da computação em nuvem é a possibilidade de ajustar dinamicamente os recursos computacionais conforme a demanda. Além disso, os cloud servers oferecem alta disponibilidade e simplificação do gerenciamento da infraestrutura, reduzindo custos operacionais associados à manutenção de servidores físicos (Stradioto; Frazzon, 2023).

No contexto da Indústria 4.0, os servidores em nuvem são amplamente utilizados para hospedar bancos de dados, sistemas de monitoramento e plataformas analíticas. Essa abordagem permite que equipes técnicas acompanhem o desempenho dos ativos em tempo real, favorecendo ações rápidas e baseadas em dados confiáveis (Agostino *et al.*, 2020).

Dessa forma, a computação em nuvem viabiliza uma gestão eficiente das informações geradas, preparando o ambiente para a aplicação de algoritmos avançados. Essa etapa é fundamental para garantir que os dados estejam organizados e acessíveis para as fases de Machine Learning e Inteligência Artificial (Machado *et al.*, 2023).

2.3.3 Machine Learning

O Machine Learning representa o momento em que os dados coletados passam a ser interpretados e transformados em conhecimento útil para a manutenção prescritiva. Até essa etapa, os dados foram apenas armazenados e organizados, sem uma análise inteligente aprofundada (Nunes; Moraes; Sardinha, 2021).

O aprendizado de máquina baseia-se em algoritmos capazes de aprender a partir de dados históricos, identificando padrões complexos sem a necessidade de programação explícita. Esses modelos evoluem continuamente conforme no-

vos dados são incorporados, aumentando sua precisão ao longo do tempo (Machado *et al.*, 2023).

Na manutenção prescritiva, o Machine Learning é empregado para prever falhas, avaliar o estado de saúde dos ativos e estimar sua vida útil. Esse tipo de abordagem permite uma atuação mais proativa, reduzindo custos de manutenção corretiva e aumentando a confiabilidade operacional (Freitas, 2016).

O uso do aprendizado de máquina contribui para a automação de análises complexas, tornando o processo decisório mais rápido e assertivo. Essa etapa é essencial para sustentar sistemas inteligentes capazes de apoiar a gestão estratégica da manutenção industrial (Pinto; Rezende, 2020).

A Inteligência Artificial (IA) complementa o Machine Learning ao ampliar a capacidade dos sistemas de analisar informações e tomar decisões de forma autônoma. Trata-se de um campo abrangente que busca desenvolver algoritmos capazes de simular habilidades humanas, como raciocínio, aprendizado e resolução de problemas complexos (Camillo, 2021).

No contexto da manutenção prescritiva, a IA é responsável por interpretar os resultados gerados pelos modelos de aprendizado de máquina e sugerir ações corretivas ou preventivas. Ela pode detectar falhas, diagnosticar causas prováveis e recomendar quando, onde e como intervir nos ativos industriais (Machado *et al.*, 2023).

Uma das principais vantagens da IA é sua capacidade de modelar múltiplos cenários e simular impactos futuros antes da execução das ações propostas. Essa funcionalidade permite avaliar a viabilidade técnica e econômica das decisões, contribuindo para uma gestão mais estratégica dos ativos (Rodrigues *et al.*, 2023).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão estratégica da manutenção industrial tem passado por profundas transformações impulsionadas pelo avanço das tecnologias associadas à Indústria 4.0. Ao longo deste estudo, foi possível compreender a evolução histórica das práticas de manutenção, desde abordagens reativas até modelos avançados baseados em monitoramento contínuo, análise de dados e inteligência artificial. Essa trajetória evidencia a mudança do papel da manutenção, que deixa de ser apenas operacional para assumir uma função estratégica dentro das organizações.

Os resultados da revisão bibliográfica demonstram que a integração de tecnologias como sensorização, Internet das Coisas, Big Data, computação em nuvem, Machine Learning e Inteligência Artificial possibilita maior previsibilidade, confiabilidade e eficiência na gestão dos ativos industriais. A manutenção prescritiva destaca-se como uma evolução significativa, ao não apenas antecipar falhas, mas também recomendar ações corretivas de forma autônoma e fundamentada.

Entretanto, o estudo também evidencia desafios relevantes para a implementação dessas estratégias, como os elevados custos iniciais, a necessidade de infraestrutura tecnológica adequada e a capacitação de profissionais especializados. Além disso, a maturidade organizacional e a confiabilidade nos sistemas autônomos ainda se configuram como fatores críticos para o sucesso da manu-

tenção prescritiva.

Dessa forma, conclui-se que a adoção da Indústria 4.0 na gestão da manutenção representa uma oportunidade estratégica para o aumento da competitividade industrial, desde que acompanhada de planejamento, investimentos e desenvolvimento contínuo de competências. Como perspectiva futura, sugere-se a realização de estudos empíricos que avaliem a aplicação prática dessas tecnologias em diferentes contextos industriais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Bruno Guerra; FABRO, Elton. Indústria 4.0 como ferramenta na engenharia de manutenção com base na metodologia TPM. **Scientia cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 23-39, 2019.
- AGOSTINO, Ícaro Romolo Sousa et al. Using a digital twin for production planning and control in industry 4.0. In: **Scheduling in industry 4.0 and cloud manufacturing**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 39-60.
- ARRIELLO, T. **Critérios para aplicação de técnicas de gestão da manutenção**. 2018. Monografia (Especialização em Gerência de Manutenção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- BELTRAME, J. O.; ANDRADE, A. R.; GONÇALVES, F. R. Análise da eficiência da manutenção através de indicadores-chave de desempenho. **Revista Multivix**, Vitória, ES, 2022.
- CAMILLO, Gabrieli Marques. **Criatividade organizacional e capacidades digitais na construção de competência de negócios internacionais: Uma análise no contexto da transformação digital**. 2021. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2021.
- FISCHER, F. et al. Análise dos indicadores de manutenção e proposta de melhoria: estudo de caso em indústria de chicotes elétricos. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 22, n. 2, p. 451-474, 2022. DOI: 10.14488/1676-1901.v22i2.4702.
- FREITAS, Laís Fulgêncio. **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de Juiz de Fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- MACHADO, Cristofer Oliveira et al. Manutenção Prescritiva: A evolução da manutenção na Indústria 4.0. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 9, p. 4444-4458, 2023.
- NUNES, Ana Rita; MORAIS, Hugo; SARDINHA, Alberto. Use of learning mechanisms to improve the condition monitoring of wind turbine generators: **A review**. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 7129, 2021.
- PINTO, C. A. S.; REZENDE, D. A. Manutenção 4.0: perspectivas e desafios da transformação digital na manutenção industrial. **Revista Gestão e Tecnologia**, v. 20, n. 1, p. 150-168, 2020.
- RODRIGUES, Ana Lúcia Vieira et al. Estudo de viabilidade para implementação de manutenção preditiva no contexto da Indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 8, p. 23133-23154, 2023.
- SCHMIDT, Marie-Christin et al. Industry 4.0 implementation in the supply chain: a review on the evolution of buyer-supplier relationships. **International Journal of Production Research**, v. 61, n. 17, p. 6063-6080, 2023.
- STRADIOTO, Luciana; FRAZZON, Enzo Morosini. Digital transformation in Brazilian industry: bridging theory and practice. **Production**, v. 33, p. e20220076, 2023.



Capítulo 6

GESTÃO EFICIENTE DA MANUTENÇÃO: O PAPEL DA TPM NA INDÚSTRIA 4.0

EFFICIENT MAINTENANCE MANAGEMENT: THE ROLE OF TPM IN INDUSTRY 4.0

Marcia Tamara Fontes Silva¹

Ronaldo de Jesus Barros²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

Este estudo teve como objetivo analisar o papel da Manutenção Produtiva Total (TPM) na gestão da manutenção industrial no contexto da Indústria 4.0, considerando suas contribuições, desafios e perspectivas. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e descritiva, baseada na análise de artigos científicos, livros e dissertações publicados nos últimos dez anos, que abordam os temas manutenção industrial, TPM e Indústria 4.0. Os resultados evidenciam que a TPM representa uma metodologia estratégica voltada à maximização da eficiência global dos equipamentos, fundamentada no envolvimento de todos os colaboradores, na prevenção de falhas e na eliminação sistemática de perdas. Observou-se que a integração da TPM com as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como sensores inteligentes, Internet das Coisas, big data e sistemas ciberfísicos, potencializa práticas de manutenção preditiva e prescritiva, ampliando a confiabilidade, a disponibilidade e a segurança dos ativos industriais. Além disso, ferramentas como o SMED e o programa 5S contribuem para a redução de desperdícios, otimização dos processos e fortalecimento da cultura de melhoria contínua. Conclui-se que a integração entre TPM e Indústria 4.0 promove uma gestão da manutenção mais eficiente, estratégica e alinhada às exigências do ambiente industrial contemporâneo.

Palavras-chave: TPM; Indústria 4.0; Manutenção preditiva; SMED.

Abstract

This study aimed to analyze the role of Total Productive Maintenance (TPM) in industrial maintenance management within the context of Industry 4.0, considering its contributions, challenges, and perspectives. The research is characterized as a qualitative and descriptive literature review, based on the analysis of scientific articles, books, and dissertations published in the last ten years that address the themes of industrial maintenance, TPM, and Industry 4.0. The results show that TPM represents a strategic methodology focused on maximizing the overall efficiency of equipment, based on the involvement of all employees, the prevention of failures, and the systematic elimination of losses. It should be noted that the integration of TPM with Industry 4.0 enabling technologies, such as smart sensors, the Internet of Things, big data, and cyber-physical systems, enhances predictive and prescriptive maintenance practices, increasing the reliability, availability, and safety of industrial assets. Furthermore, tools such as SMED and the 5S program were selected for waste reduction, process optimization, and strengthening a culture of continuous improvement. It is concluded that the integration between TPM and Industry 4.0 promotes more efficient, strategic and controlled maintenance management according to the contemporary industrial environment.

Keywords: TPM; Industry 4.0; Predictive maintenance; SMED.

1 INTRODUÇÃO

A gestão da manutenção tem se consolidado como um dos principais pilares estratégicos para a competitividade industrial, uma vez que a disponibilidade, a confiabilidade e o desempenho dos ativos produtivos influenciam diretamente os resultados organizacionais. Em um ambiente industrial cada vez mais dinâmico e orientado à eficiência, a manutenção deixa de assumir um papel meramente operacional e corretivo, passando a integrar o planejamento estratégico das empresas, com foco na continuidade dos processos produtivos, na redução de custos e no aumento da produtividade.

Nesse contexto, a Manutenção Produtiva Total (TPM – *Total Productive Maintenance*) destaca-se como uma metodologia amplamente difundida no ambiente industrial, por propor uma abordagem sistêmica baseada no envolvimento de todos

os colaboradores na preservação e melhoria contínua dos equipamentos. Diferentemente dos modelos tradicionais, a TPM promove a integração entre operadores, técnicos e gestores, compartilhando responsabilidades e fortalecendo a cultura organizacional voltada à eliminação de perdas, à maximização da eficiência global dos equipamentos e ao aprimoramento contínuo dos processos.

Com o avanço da Indústria 4.0, caracterizada pela digitalização dos sistemas produtivos, pelo uso de sensores inteligentes, pela Internet das Coisas (IoT), pela análise de grandes volumes de dados (*big data*) e pela automação avançada, surgem novas possibilidades e desafios para a gestão da manutenção. Essas tecnologias permitem a transição de estratégias predominantemente reativas e preventivas para modelos preditivos e prescritivos, nos quais as decisões são baseadas em dados em tempo real, aumentando a assertividade das intervenções e reduzindo falhas inesperadas.

Diante desse cenário, torna-se relevante investigar como a TPM pode ser integrada às tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, potencializando seus resultados e ampliando sua aplicabilidade. Assim, o problema de pesquisa que norteia este estudo consiste em responder à seguinte questão: quais são os desafios e as oportunidades na implementação da Manutenção Produtiva Total como estratégia de gestão da manutenção no contexto da Indústria 4.0?

A justificativa deste trabalho fundamenta-se na importância de aprofundar a compreensão teórica sobre a relação entre TPM e Indústria 4.0, especialmente a partir de uma revisão da literatura científica. Ao sistematizar conceitos, discussões, desafios e perspectivas apresentados por diferentes autores, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento acadêmico na área de gestão da manutenção.

Dessa forma, o objetivo geral deste estudo foi analisar o papel da Manutenção Produtiva Total (TPM) na gestão da manutenção no contexto da Indústria 4.0. Como objetivos específicos, buscou-se: descrever os fundamentos e princípios da TPM no ambiente industrial; compreender as contribuições da Indústria 4.0 para a evolução das práticas de manutenção; e discutir os desafios e as perspectivas apontados pela literatura acerca da integração da TPM na era digital.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A pesquisa desenvolvida caracterizou-se como uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa e descritiva, uma vez que buscou analisar e discutir, a partir de fontes teóricas já publicadas, as relações entre a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Indústria 4.0 no âmbito da gestão da manutenção. Para tanto, foi realizada uma busca por materiais científicos que trataram da temática, de forma a identificar as contribuições já existentes na literatura e sistematizar os principais conceitos, discussões e perspectivas.

O levantamento de dados foi conduzido por meio de consultas em bases de dados acadêmicas, tais como Google Acadêmico, SciELO e CAPES Periódicos, além de livros e dissertações disponíveis em bibliotecas digitais. Foram incluídos trabalhos publicados nos últimos dez anos (2015–2025), em português e inglês, que abordaram diretamente os temas relacionados à manutenção, TPM e Indústria 4.0. Foram excluídos artigos de opinião, resumos de congressos, textos de divulgação não científica e revisões muito superficiais que não apresentaram aprofundamento conceitual.

Para a busca, foram utilizados descritores como “Manutenção Produtiva Total”, “TPM”, “Gestão da Manutenção”, “Indústria 4.0” e “Manutenção Preditiva”, de forma isolada e combinada. A seleção e análise dos trabalhos seguiram o critério de relevância para o tema, priorizando produções acadêmicas que apresentaram discussões conceituais, análises comparativas e perspectivas sobre a integração entre a TPM e as tecnologias da Indústria 4.0. Dessa maneira, foi possível construir um panorama consistente sobre a temática, respondendo ao problema de pesquisa proposto.

2.2 Resultados e Discussão

A manutenção desempenha um papel central no ambiente industrial, uma vez que influencia diretamente a produtividade, a eficiência e a competitividade das organizações. A ocorrência de falhas inesperadas em equipamentos pode comprometer seriamente o fluxo produtivo, gerando atrasos, aumento de custos, retrabalho e desperdícios (Baldissarelli; Fabro, 2019).

Com a difusão dos princípios da produção enxuta e da filosofia *just-in-time*, a gestão da manutenção passou a ser vista não apenas como uma atividade corretiva, mas como um elemento fundamental para a eliminação de perdas e para a otimização dos processos (Agostino *et al.*, 2020).

Entre as metodologias consolidadas nesse cenário, a Manutenção Produtiva Total (TPM) tem se destacado como abordagem estruturada para maximizar a eficiência dos equipamentos. Seu diferencial está na participação ativa dos colaboradores em todos os níveis da organização, promovendo a autonomia operacional, a capacitação contínua e a prevenção sistemática de falhas (Aguiar, 2019).

Entre as metodologias voltadas à melhoria da eficiência operacional destaca-se o SMED (*Single Minute Exchange of Die*), conhecido como Troca Rápida de Ferramentas. Essa abordagem tem como finalidade principal reduzir o tempo de *setup*, por meio da análise sistemática e da reorganização das atividades en-

volvidas na troca de ferramentas, dispositivos ou produtos, promovendo maior flexibilidade e produtividade industrial (Lima; Silva, 2018).

A implementação do SMED ocorre de maneira estruturada em quatro estágios conceituais, orientados à melhoria contínua do processo de preparação. No estágio inicial, não há distinção entre atividades internas e externas, o que implica a realização de tarefas com o equipamento parado, ampliando desnecessariamente o tempo de inatividade (Lima; Silva, 2018).

No segundo estágio, procede-se à separação entre *setup* interno — executado com a máquina parada — e *setup* externo — realizado com o equipamento em funcionamento. Essa distinção permite o planejamento prévio das operações, a utilização de listas de verificação e a inspeção antecipada de ferramentas e componentes, reduzindo o tempo improdutivo (Marques; Brito, 2019).

No terceiro estágio, desenvolve-se uma análise detalhada das operações com o propósito de converter atividades internas em externas sempre que possível, minimizando o tempo de parada e elevando a eficiência do processo produtivo (Carvalho, 2022).

O quarto estágio concentra-se na racionalização e padronização das operações, abrangendo tanto o *setup* interno quanto o externo. Nessa etapa, busca-se eliminar ajustes desnecessários, aperfeiçoar métodos de fixação, implementar dispositivos de troca rápida e estabelecer procedimentos operacionais padronizados, consolidando ganhos sustentáveis de desempenho (Carvalho, 2022).

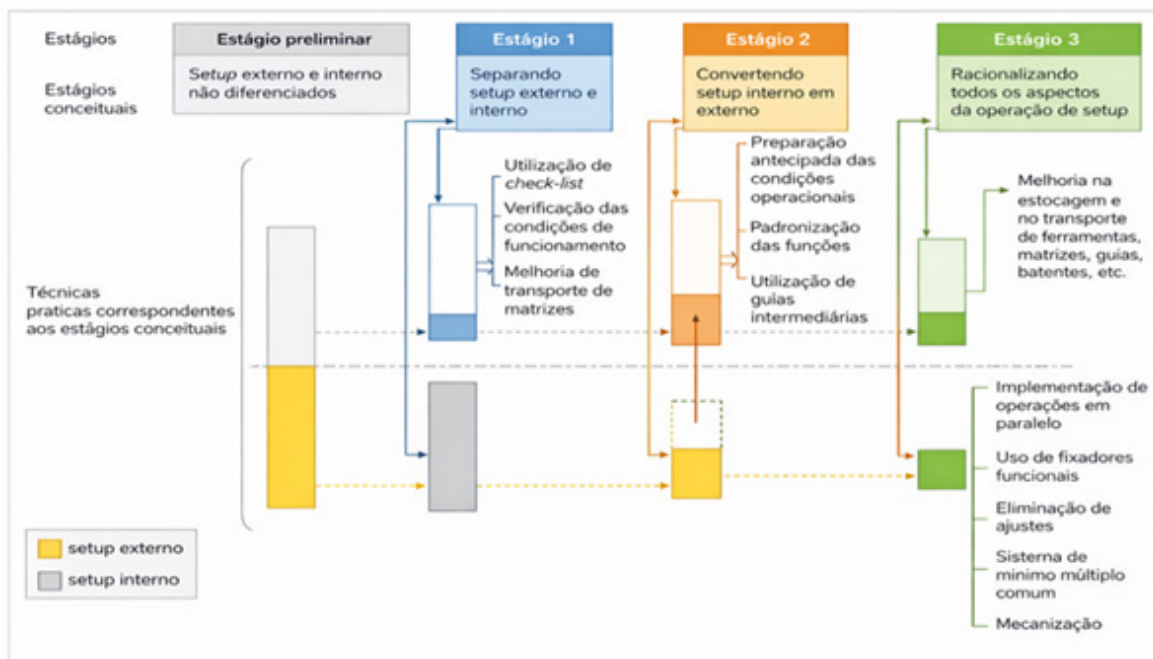


Figura 1. Aplicações SMED

Fonte: Adaptado Dantas (2019).

A aplicação do SMED permite identificar etapas que não agregam valor ao processo e reorganizá-las de forma a minimizar paradas de máquina, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade e da flexibilidade do sistema produtivo.

A redução dos tempos de setup proporciona diversos benefícios à organização, como o aumento do tempo efetivo de operação das máquinas, a viabilização

da produção em lotes menores e a consequente diminuição dos níveis de estoque, tanto de produtos acabados quanto intermediários (Carvalho, 2022).

2.2.1 Manutenção Produtiva Total: Conceito, Pilares e Benefícios

Aguiar (2019), ressalta que a integração da TPM com outras metodologias, como Lean e Teoria das Restrições, potencializa a gestão de gargalos produtivos. A sinergia entre essas ferramentas permite identificar perdas com maior precisão e agir diretamente sobre os pontos críticos do processo. Dessa forma, a TPM não se limita à manutenção, mas amplia sua relevância estratégica dentro da organização.

Conforme a Figura 2, a TPM é estruturada em oito pilares: manutenção autônoma, manutenção planejada, melhoria focalizada, educação e treinamento, gestão da qualidade, segurança, saúde e meio ambiente, Office TPM e desenvolvimento inicial de equipamentos. Cada pilar contribui para aumentar a eficiência, prevenir falhas, eliminar desperdícios e capacitar os colaboradores.



Figura 2. 8 Pilares da TPM

Fonte: Adaptado Dantas (2019).

Silva (2023) analisa a implementação da TPM em uma indústria metalomecânica, evidenciando que a capacitação técnica dos operadores é um fator decisivo para o sucesso da metodologia. Segundo a autora, a formação contínua fortalece a autonomia dos colaboradores, gera operadores multifuncionais e reduz o tempo de resposta diante de falhas.

Santos e Andrade (2021) explicam que a TPM é uma metodologia de gestão voltada para aumentar a eficiência dos equipamentos, por meio da eliminação de falhas e perdas. Os autores destacam que sua aplicação depende da participação de todos os colaboradores, criando uma cultura organizacional que valoriza a manutenção como responsabilidade coletiva.

O pilar de Educação e Treinamento é essencial para que os colaboradores adquiram o conhecimento necessário para operar e manter os equipamentos de forma eficiente. A capacitação contínua contribui para a melhoria das habilidades técnicas, reduzindo falhas operacionais e fortalecendo a cultura de aperfei-

çoamento dentro da empresa (Carvalho, 2022).

A Gestão Antecipada tem como objetivo prever falhas e implementar melhorias que assegurem a eficiência dos equipamentos diante das demandas futuras. Essa prática baseia-se na análise de informações de manutenção, permitindo que problemas sejam identificados e solucionados antes de impactar a produção, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade dos ativos (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019).

A Manutenção da Qualidade garante que os equipamentos operem de modo a evitar defeitos nos produtos. Quando as máquinas não estão em boas condições, a qualidade final pode ser comprometida, gerando retrabalhos e desperdícios. A aplicação desse pilar assegura que o processo produtivo atenda sempre a elevados padrões de qualidade (Ivanov; Dolgui; Sokolov, 2019).

O pilar de Segurança, Saúde e Meio Ambiente busca integrar práticas que promovam bem-estar aos trabalhadores e sustentabilidade às operações. Sua aplicação reduz acidentes de trabalho, melhora as condições ergonômicas e minimiza impactos ambientais (Lima; Silva, 2018).

2.2.2 Relação entre TPM e indústria 4.0: modernização da manutenção

A Indústria 4.0, conhecida também como Quarta Revolução Industrial, é um modelo inovador que integra diversas tecnologias, atuando principalmente nos campos de automação, controle e tecnologia. Essa revolução vai além da simples conectividade de sistemas e máquinas, caracterizando-se pela fusão e interação de tecnologias físicas, digitais e biológicas, diferenciando-se das revoluções industriais anteriores (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019).

A Indústria 4.0 surge como um conjunto de inovações de ruptura que impactam diretamente os conceitos de operações, sendo marcada pela digitalização e interconexão de produtos, cadeias de valor e modelos de negócios. A produção inteligente (*Smart Production*) e a fábrica inteligente (*Smart Factory*) representam elementos centrais desse modelo, permitindo maior eficiência e menor interferência humana nos processos produtivos (Morais; Monteiro, 2016).

A adoção da Indústria 4.0 também influencia o mercado de trabalho e a formação de profissionais. Os trabalhadores devem se preparar para novas funções decorrentes da automação, enquanto a educação em engenharia precisa formar profissionais conscientes das tendências tecnológicas e das oportunidades que surgem com essas mudanças (Ivanov; Dolgui; Sokolov, 2019).

Os avanços tecnológicos das últimas décadas possibilitam a conexão de sensores, máquinas e ferramentas ao longo de toda a cadeia produtiva. Nove eixos sustentam esse desenvolvimento: Big Data e análise de dados, robótica, simulação, Internet das Coisas, cibersegurança, computação em nuvem, integração horizontal e vertical, realidade aumentada e processos aditivos (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019).

Além de transformar a produção, a Indústria 4.0 impacta significativamente a gestão industrial e os modelos de negócios. A digitalização e automação permitem otimização dos processos, aumento da eficiência operacional e maior

competitividade das empresas, afetando todo o ciclo de vida do produto e redefinindo estratégias empresariais no cenário global (Lima; Silva, 2018).

Outro aspecto relevante é a manutenção industrial em que a implementação de sistemas ciberfísicos possibilita a manutenção preditiva, na qual sensores inteligentes monitoram continuamente os equipamentos, antecipando falhas antes que comprometam a produção. Essa prática reduz custos, evita paradas não programadas e aumenta a confiabilidade e disponibilidade dos ativos industriais (Marques; Brito, 2019).

A Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Indústria 4.0 representam abordagens complementares que, quando integradas, transformam profundamente a manutenção industrial (Lima; Silva, 2018). A TPM busca maximizar a eficiência dos equipamentos e envolve todos os colaboradores na melhoria contínua dos processos produtivos. A Indústria 4.0 introduz tecnologias avançadas, como Internet das Coisas, Inteligência Artificial e Big Data, criando ambientes de produção inteligentes, interconectados e altamente eficientes.

A manutenção preditiva é um dos principais benefícios dessa integração (Marques; Brito, 2019). Sensores instalados nos equipamentos permitem a coleta de dados em tempo real, enquanto sistemas inteligentes identificam padrões e antecipam possíveis falhas. Esse monitoramento contínuo possibilita intervenções preventivas, reduzindo paradas inesperadas e promovendo maior eficiência operacional.

Outro pilar da TPM, a manutenção autônoma, também é potencializada pelas tecnologias digitais (Moraes; Monteiro, 2016). Operadores podem acompanhar o desempenho das máquinas em tempo real, realizar inspeções periódicas e executar pequenas intervenções com mais precisão, aumentando a confiabilidade dos equipamentos e reduzindo a dependência de equipes especializadas.

Segundo Neto et al. (2023) em que monitoramento contínuo permite detectar desvios nos processos e implementar ações corretivas rapidamente, reduzindo defeitos e retrabalhos. Ferramentas digitais de treinamento, como simuladores virtuais e plataformas interativas, tornam o aprendizado mais eficiente, preparando os funcionários para operar em ambientes complexos e inovadores.

A integração de TPM e Indústria 4.0 moderniza a gestão administrativa e o desenvolvimento de produtos (Silva et al., 2021). Sistemas digitais proporcionam uma visão unificada dos processos, permitindo planejar intervenções de forma otimizada e antecipar falhas durante a concepção dos equipamentos. Essa abordagem promove maior confiabilidade, redução de custos e maior sustentabilidade operacional, fortalecendo a cultura de melhoria contínua e a inovação tecnológica nas empresas.

A TPM começa com a aplicação do programa 5S, que organiza e limpa o local de trabalho, tornando problemas visíveis e facilitando a identificação de melhorias. Essa prática japonesa busca mudar a mentalidade das pessoas, promovendo comportamentos positivos e duradouros, não sendo apenas um evento esporádico de limpeza. O 5S contribui para ganhos reais de produtividade e serve como base para o desenvolvimento da qualidade na empresa (Agostino et al., 2020).

O Senso de Arrumação consiste em classificar os itens conforme sua utilidade, separando o que é crítico, importante, usado com frequência ou desneces-

sário. Essa organização reduz o tempo de busca e otimiza o espaço, permitindo que itens essenciais estejam sempre acessíveis. Itens não utilizados devem ser armazenados ou descartados de forma adequada (Aguiar, 2019).

A ocorrência de falhas em máquinas e equipamentos industriais pode gerar impactos expressivos na dinâmica produtiva, refletindo no aumento de custos operacionais, perdas de matéria-prima, interrupções no fluxo de produção e diminuição da competitividade organizacional (Marques; Brito, 2019). Nesse cenário, a manutenção assume papel estratégico ao assegurar que máquinas, equipamentos e instalações operem em condições adequadas de desempenho.

O Senso de Ordenação estabelece que cada item deve ter um lugar definido, utilizando etiquetas, placas e prateleiras adequadas. Itens pesados devem ficar na parte inferior das prateleiras, e cada objeto precisa ser devolvido ao seu local após o uso. Essa prática facilita a identificação rápida e evita desperdício de tempo (Baldissarelli; Fabro, 2019).

O Senso de Limpeza e o Senso de Autodisciplina mantêm o ambiente seguro e funcional, livre de sujeira, resíduos e vazamentos. A autodisciplina incentiva o cumprimento de normas, procedimentos e pontualidade, tornando o 5S um estilo de vida dentro da organização (Carvalho, 2022).

O desempenho adequado de uma instalação elétrica depende diretamente de um planejamento criterioso. Antes da execução, é indispensável a elaboração de um projeto que contemple desde os custos e prazos até os materiais e métodos construtivos previstos (Pinto; Oliveira; Santos, 2019).

Conforme determina a NBR 5410/2004, todo projeto deve atender a requisitos mínimos que garantam segurança e funcionalidade. Devem ser considerados parâmetros técnicos como capacidade de condução de corrente, queda de tensão admissível, temperatura ambiente e correntes de curto-circuito (Henao; Sarache; Gómez, 2019).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu analisar a importância da Manutenção Produtiva Total como estratégia de gestão da manutenção no contexto da Indústria 4.0, evidenciando que os objetivos propostos foram alcançados. A partir da revisão da literatura, foi possível compreender que a TPM ultrapassa a abordagem tradicional da manutenção, assumindo um papel estratégico ao promover o envolvimento de todos os colaboradores, a prevenção de falhas e a melhoria contínua dos processos produtivos.

Os resultados demonstram que a integração da TPM com as tecnologias da Indústria 4.0 amplia significativamente seus benefícios, possibilitando a adoção de práticas mais eficientes, como a manutenção preditiva e a tomada de decisão baseada em dados em tempo real. Ferramentas como o SMED e o programa 5S destacam-se como importantes aliadas na redução de desperdícios, no aumento da flexibilidade produtiva e na melhoria da organização e padronização dos ambientes industriais, contribuindo para ganhos expressivos de produtividade e confiabilidade dos equipamentos.

Como limitação do estudo, destaca-se o fato de a pesquisa estar fundamentada exclusivamente em fontes bibliográficas, não contemplando a aplicação

prática das metodologias analisadas em ambientes industriais reais. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros explorem estudos de caso, análises comparativas ou pesquisas empíricas, de modo a aprofundar a compreensão sobre os impactos da integração entre TPM e Indústria 4.0 na realidade das organizações industriais.

REFERÊNCIAS

AGOSTINO, Ícaro Romolo Sousa *et al.* Using a digital twin for production planning and control in industry 4.0. In: **SCHEDULING in industry 4.0 and cloud manufacturing**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 39–60.

AGUIAR, M. F. Interações entre Manutenção Produtiva Total e Gestão da Qualidade Total: estudo de caso em uma empresa do setor alimentício. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, ano 19, edição especial, p. 122–134, 2019.

BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. Manutenção preditiva na indústria 4.0. **Scientia cum Industria**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 12–22, 2019. Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/6835>. Acesso em: 21 sep. 2025.

CARVALHO, R. Manutenção autônoma: o primeiro pilar da TPM. **Revista Científica e-Locução**, v. 1, n. 22, p. 16, 19 dez. 2026.

DANTAS, A. Introdução ao WCM. **Apostila do curso de Especialização em Engenharia de Produção**. UTFPR, Curitiba. 2019.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15–26, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>. Acesso em: 27 fev. 2026.

IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the supply chain resilience. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 8, p. 2564–2583, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>. Acesso em: 27 fev. 2026.

LIMA, R. L. A.; SILVA, J. E. A. R. Manutenção produtiva total: um estudo de caso sobre a implementação de um modelo de gestão da manutenção. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 38., 2018. Anais [...]. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_258_483_35872.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 8913–8923, jul. 2019.

MORAIS, R. R.; MONTEIRO, R. A indústria 4.0 e o impacto na área de operações: um ensaio. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE (SINGEP)**, 5., 2016, São Paulo. Anais [...]. Disponível em: <https://singep.org.br/5singep/resultado/450.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2026.

NETO, Elias Aoad *et al.* O impacto das tecnologias digitais na eficácia da manutenção preditiva industrial. **Revista Científica SENAI-SP – Educação, Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 2, p. 59–83, 2023.



Capítulo 7

SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA APLICADOS À MINERAÇÃO: INTEGRAÇÃO COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ARMAZENAMENTO EM BATERIAS

HYBRID ENERGY SYSTEMS APPLIED TO MINING: INTEGRATION WITH PHOTOVOLTAIC GENERATION AND BATTERY STORAGE

Antonio de Jesus Licar Pires Junior¹

Mirian Nunes de Carvalho Nunes²

Lilian Barros Santiago³

¹ Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

³ Docente, Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

O setor de mineração enfrenta desafios relacionados à confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, especialmente em regiões remotas, além da necessidade crescente de reduzir impactos ambientais e aumentar a eficiência energética das operações. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o papel das microrredes industriais híbridas, compostas por sistemas fotovoltaicos e armazenamento de energia em baterias (BESS), na melhoria da qualidade de energia, da resiliência operacional e da descarbonização no setor minerador. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão sistemática da literatura, utilizando artigos científicos, dissertações e normas técnicas selecionados em bases de dados especializadas, com foco em estudos publicados nos últimos dez anos sobre microrredes, armazenamento de energia e mineração. Os resultados demonstram que a integração entre fontes renováveis e sistemas de armazenamento contribui para maior estabilidade elétrica, redução do consumo de combustíveis fósseis e aumento da eficiência operacional. Além disso, estratégias de gerenciamento energético, como *peak shaving* e operação em modo isolado, apresentam potencial para reduzir custos operacionais e ampliar a confiabilidade do sistema elétrico. Conclui-se que as microrredes híbridas representam uma solução tecnicamente viável e estratégica para promover sustentabilidade, segurança energética e eficiência nas operações de mineração.

Palavras-chave: Microrredes. BESS. Mineração.

Abstract

The mining sector faces challenges related to the reliability of electricity supply, especially in remote regions, in addition to the growing need to reduce environmental impacts and increase the energy efficiency of operations. In this context, this study aims to analyze the role of hybrid industrial microgrids, composed of photovoltaic systems and battery energy storage (BESS), in improving power quality, operational resilience, and decarbonization in the mining sector. The research was developed through a systematic literature review, using scientific articles, dissertations, and technical standards selected from specialized databases, focusing on studies published in the last ten years on microgrids, energy storage, and mining. The results demonstrate that the integration between renewable sources and storage systems contributes to greater electrical stability, reduced consumption of fossil fuels, and increased operational efficiency. Furthermore, energy management strategies, such as peak shaving and isolated mode operation, have the potential to reduce operating costs and increase the reliability of the electrical system. It is concluded that hybrid microgrids represent a technically viable and strategic solution to promote sustainability, energy security, and efficiency in mining operations.

Keywords: Microgrids. BESS. Mining.

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura elétrica global atravessa um período de transformação estrutural, migrando de um modelo tradicional de geração centralizada para arquiteturas descentralizadas, digitais e mais flexíveis. Essa transição é impulsionada pelo desenvolvimento tecnológico, pela necessidade de maior desempenho energético e pela crescente demanda por sustentabilidade. Para setores de missão crítica, como a mineração, essa mudança não representa apenas uma evolução técnica, mas uma exigência estratégica diante de um cenário regulatório e ambiental cada vez mais rigoroso.

A mineração enfrenta o desafio urgente de reduzir seu impacto ambiental e alinhar suas operações às metas de ESG (Nehring; Knights, 2024). No entanto, grande parte das atividades mineradoras ocorre em regiões remotas, frequentemente localizadas no final de longas linhas de transmissão ou totalmente isoladas (*off-grid*). Nessas condições, a instabilidade no fornecimento de energia elétrica compromete não apenas a produtividade, mas também a segurança operacional e a competitividade global do setor (Perry, 2026).

Historicamente, o suprimento energético em áreas remotas e operações industriais isoladas tem sido garantido por geradores a diesel. Entretanto, apesar de sua consolidação técnica, essa solução apresenta altos custos operacionais, devido a dependência de combustíveis fósseis e significativa liberação de gases de efeito estufa, tornando-se cada vez menos viável sob a ótica de transição energética (Irena, 2020).

Como a mineração é um setor altamente intensivo em energia, a estabilidade do fornecimento elétrico é inegociável. A interrupção de processos contínuos pode gerar perdas produtivas milionárias e danos severos a equipamentos de grande porte (Igogo *et al.*, 2021). Diante desse cenário, emerge o seguinte problema de pesquisa: como a implementação de microrredes industriais híbridas, integrando geração fotovoltaica, Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) e sistemas avançados de controle, pode mitigar os impactos da má qualidade de energia e garantir a continuidade operacional nas atividades mineradoras?

O conceito de microrredes foi formalmente introduzido no início dos anos 2000 pelo consórcio CERTS (*Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*), em que foi proposta a integração de diferentes fontes de geração distribuída, cargas e sistemas de armazenamento de energia, organizados de forma a permitir que o sistema opere tanto conectado à rede elétrica principal quanto de maneira independente, em modo isolado, aumentando a confiabilidade e a flexibilidade do sistema elétrico (Hirsch; Parag; Guerrero, 2018), definindo-as como sistemas elétricos capazes de integrar cargas e recursos energéticos distribuídos dentro de limites elétricos claramente estabelecidos, atuando como uma entidade controlável única em relação ao sistema elétrico principal. Essas redes possuem a capacidade de se conectar ou se desconectar da rede elétrica convencional, permitindo sua operação tanto em modo conectado quanto em modo ilhado (Hatziargyriou, 2023) característica particularmente relevante para ambientes industriais remotos. A integração de usinas solares com sistemas BESS, associada a estratégias modernas de gerenciamento de energia (EMS), amplia a capacidade de resposta do sistema, permitindo funções como *black start*, além do controle ativo de frequência e tensão (Li *et al.*, 2025).

Dessa forma, busca-se neste estudo analisar o papel das microrredes industriais compostas por sistemas fotovoltaicos e BESS na mitigação dos desafios relacionados à qualidade de energia, à resiliência operacional e à descarbonização na mineração. Para isso, busca-se descrever as arquiteturas e modos de operação das microrredes, identificar seus níveis de controle hierárquico e investigar estratégias operacionais, como transições entre modos de operação e otimização econômica por meio do *peak shaving*. Ao final, espera-se demonstrar a viabilidade técnica e estratégica dessas soluções como caminho para uma mineração mais eficiente, resiliente e sustentável.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O presente estudo foi conduzido a partir de uma Revisão, adotando um método estruturado, transparente e replicável para identificar, avaliar e sintetizar as produções científicas mais relevantes sobre o tema. O tipo de pesquisa a ser realizado neste trabalho, será uma revisão de Literatura, no qual será realizada uma consulta a livros, dissertações e por artigos científicos selecionados através de busca nas seguintes bases de dados IEEE Xplore, *ScienceDirect* (Elsevier) e Google Acadêmico. O período dos artigos pesquisados serão os trabalhos publicados nos últimos 10 anos as palavras-chave utilizadas na busca serão: Bess, microrredes industriais e mineração.

A estratégia de busca foi cuidadosamente estruturada para contemplar tantas aplicações práticas na indústria pesada — com ênfase na mineração — quanto os fundamentos clássicos de controle e operação de microrredes desenvolvidos ao longo da última década. Os critérios de inclusão dos estudos priorizaram trabalhos com aderência conceitual sólida aos fundamentos de microrredes, especialmente no que se refere à hierarquia de controle (primário, secundário e terciário) e aos modos de operação. A seleção dos estudos também considerou como referência as principais normas internacionais relacionadas à operação e controle de microrredes. Entre elas destacam-se a IEEE 2030.7, que estabelece os requisitos para controladores de microrredes, e a IEEE 2030.8, que define os procedimentos de teste e validação desses controladores (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018a; *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018b). Além disso, foram consideradas recomendações técnicas da IEC (*International Electrotechnical Commission*) voltadas à interoperabilidade de sistemas elétricos distribuídos. Dessa forma, foram incluídos na revisão estudos que apresentam aderência conceitual ou aplicação prática alinhada a essas diretrizes normativas, garantindo consistência técnica entre a literatura analisada e os padrões internacionais utilizados na engenharia de microrredes. Por outro lado, foram excluídos estudos voltados exclusivamente a ambientes residenciais de baixa complexidade operacional e reduzida demanda energética. Para este estudo, consideram-se sistemas de grande porte aqueles com demanda típica na ordem de centenas de kW a dezenas de MW, característicos de aplicações industriais, especialmente no setor de mineração. Por fim, o processo de triagem foi realizado em etapas sucessivas: inicialmente, pela leitura dos títulos; em seguida, pela análise dos resumos; e, por fim, pela leitura completa e crítica dos textos selecionados. A busca inicial resultou em aproximadamente 45 artigos. Após a

aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 30 artigos foram selecionados para análise dos resumos e, ao final, 26 estudos foram incluídos na revisão completa.

2.2 Resultados e Discussão

A indústria de mineração apresenta elevada intensidade energética e frequentemente opera em regiões remotas, exigindo soluções confiáveis para garantir a continuidade das operações. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento em baterias destacam-se por sua rápida resposta, sendo capazes de fornecer potência quase instantaneamente para compensar desequilíbrios no sistema (Shi *et al.*, 2018).

A adoção de fontes renováveis no setor é impulsionada por fatores econômicos, ambientais e pressões regulatórias (Igogo *et al.*, 2021). Sob essa perspectiva, para viabilizar tecnicamente essa transição e garantir a confiabilidade do suprimento energético, torna-se fundamental a utilização de sistemas de armazenamento de energia, os quais permitem compensar a variabilidade inerente às fontes renováveis e manter a estabilidade do sistema elétrico (Igogo *et al.*, 2021).

Enquanto Igogo *et al.* (2021) enfatizam que a adoção de fontes renováveis na mineração é motivada principalmente por fatores econômicos e pressões regulatórias, Shi *et al.*, (2018) demonstra que a viabilidade operacional dessas fontes depende diretamente da integração com sistemas de armazenamento em baterias. Dessa forma, observa-se que o BESS não apenas complementa a geração renovável, mas atua como elemento central para garantir estabilidade em sistemas industriais de alta demanda.

Microrredes são sistemas formados por cargas e fontes de energia distribuídas que funcionam de forma controlada e integrada, conectados à rede principal ou de maneira isolada. Para melhor compreensão da estrutura de uma microrrede híbrida, a Figura 1 apresenta um modelo típico de integração entre fontes renováveis, sistemas de armazenamento e geração convencional.

A Figura 1 apresenta uma estrutura típica com geração fotovoltaica, eólica, sistema de armazenamento em baterias (BESS) e gerador a diesel, interligados a uma barra CA e conectados à rede por meio do ponto de acoplamento comum (PCC), permitindo operação conectada ou ilhada (Figueredo, 2024).

Devido à variabilidade das fontes renováveis e à baixa inércia dos sistemas baseados em eletrônica de potência, as microrredes utilizam controle hierárquico em três níveis. O controle primário atua em mi-

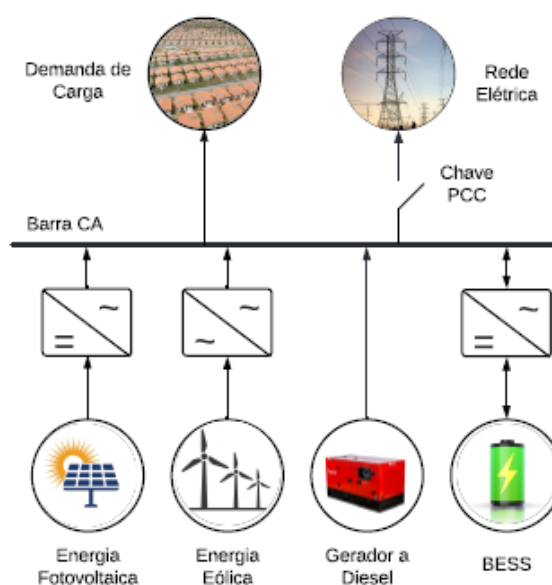


Figura 1. Topologia de microrrede.

Fonte: Adaptado de FIGUEREDO (2024).

lissegundos, garantindo estabilidade e compartilhamento de potência por meio do *droop control*, que ajusta tensão e frequência conforme a carga (Guerrero et al., 2011). O secundário opera em segundos a minutos, restaurando os valores nominais, enquanto o terciário atua de minutos a horas, realizando o gerenciamento e a otimização energética via EMS (IEEE, 2018a).

Sob a perspectiva do Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS), a resiliência de uma microrrede depende da sua capacidade de operar tanto conectada à rede principal (*on-grid*) quanto de forma isolada (*off-grid*). Em ambientes industriais, especialmente em indústrias pesadas, a transição entre esses modos deve ocorrer de forma suave (*seamless switching*), evitando que distúrbios externos, como afundamentos de tensão, afetem equipamentos críticos da planta. (Lavanya; Senthil kumar, 2020).

Em situações severas, como um blecaute total, torna-se essencial a funcionalidade de *black start*, que permite reiniciar a microrrede de forma autônoma, sem depender da rede externa. Nesse processo, o Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) atua como fonte formadora de rede (*grid-forming*), estabelecendo as referências de tensão e frequência necessárias para a reenergização do sistema (Seo et al., 2025).

Para garantir uma retomada segura da operação, o BESS deve suportar elevadas correntes de energização (*inrush*), associadas à magnetização de transformadores e à partida de motores industriais. Esses requisitos evidenciam a importância das aplicações industriais e operação híbrida em microrredes, nas quais diferentes fontes de geração e armazenamento são integradas para aumentar a confiabilidade e a flexibilidade energética do sistema (Oviedo et al., 2022).

A literatura sobre microrredes industriais aponta que a implementação prática do controle hierárquico enfrenta desafios adicionais em ambientes produtivos, devido à presença de cargas pesadas e não lineares, como moinhos e britadores. Essas características tornam as microrredes industriais significativamente distintas das aplicações comerciais e residenciais (Zia; Elbouchikhi; Benbouzid, 2018).

Em operações remotas (*off-grid*), estudos mostram que sistemas híbridos que combinam Usinas Fotovoltaicas (UFV), Sistemas de Armazenamento em Baterias (BESS) e Geradores a Diesel (GMG) representam uma solução robusta para garantir estabilidade e continuidade energética. Nesses cenários, o BESS desempenha papel fundamental na compensação de variações na geração solar e na manutenção da estabilidade da frequência da microrrede (Vuić et al., 2023).

As funcionalidades do sistema de gerenciamento de energia (EMS) associadas ao uso de sistemas de armazenamento em baterias (BESS) podem gerar ganhos econômicos ao permitir estratégias de *peak shaving*, nas quais a bateria descarrega em períodos de alta demanda para reduzir o pico de carga do sistema, diminuindo custos tarifários e otimizando a operação de recursos energéticos distribuídos em microrredes (Li et al., 2021).

Aliado a isso, o *Time-shifting* (arbitragem de energia) possibilita armazenar a geração solar excedente durante o dia para utilização no horário de ponta ou durante o turno noturno de escavação (Rocha et al., 2023). Tais aplicações de engenharia comprovam que as microrredes industriais deixaram de ser apenas provas de conceito, consolidando-se como uma solução tecnológica relevante para promover sustentabilidade energética, eficiência operacional e maior confiabilidade do suprimento elétrico nas operações de mineração (Gómez et al., 2020).

Para além da robustez teórica, estudos científicos e relatórios de engenharia de indústrias de missão crítica apresentam dados quantitativos que permitem avaliar o desempenho de microrredes e sistemas híbridos em ambientes industriais. Essas métricas funcionam como benchmarks numéricos, evidenciando ganhos de eficiência, confiabilidade e estabilidade energética na prática (Aladesanmi; Ogudo, 2024).

A capacidade de *black start* em microrredes tem sido viabilizada pelo uso de inversores *grid-forming*, capazes de estabelecer tensão e frequência de forma autônoma e permitir a energização controlada de transformadores. Estratégias de controle baseadas em rampa de tensão ajudam a limitar correntes de magnetização (*inrush current*), possibilitando o arranque de cargas de grande porte sem necessidade de grande sobredimensionamento do sistema de conversão de potência (Seo et al., 2025).

A mitigação de picos de carga por meio de sistemas de armazenamento em baterias (BESS) permite reduzir a potência máxima demandada da rede, resultando em economia significativa nos custos de eletricidade e melhor aproveitamento da infraestrutura elétrica existente. Essa estratégia, conhecida como *peak shaving*, consiste em armazenar energia em períodos de baixa demanda e descarregá-la nos momentos de maior consumo, reduzindo a demanda faturada pelas concessionárias (Shi et al., 2018).

Em cenários operacionais *off-grid*, a hibridização entre geração renovável e sistemas de armazenamento de energia tem demonstrado impactos significativos na redução do consumo de combustíveis fósseis em operações industriais isoladas. A integração entre fontes solares fotovoltaicas e sistemas de armazenamento em baterias reduz a dependência de geradores a diesel, aumentando a eficiência energética e contribuindo para a descarbonização de sistemas elétricos em regiões remotas (Shi et al., 2018).

A análise técnico-econômica do sistema híbrido composto por energia solar fotovoltaica, turbinas eólicas e armazenamento em baterias demonstrou elevada viabilidade para aplicações no setor de mineração. O sistema apresentou geração anual de aproximadamente 15.835 MWh, com participação eólica de cerca de 25%, além de taxa interna de retorno de 23,5% e payback de 4,9 anos, evidenciando competitividade econômica da solução (Nkambule; Hasan; Shongwe, 2023).

Além disso, o sistema apresentou boa confiabilidade energética, com LPSP de 0,1508, e expressivos benefícios ambientais, incluindo redução anual de cerca de 1,7 milhão de kg de CO₂ e diminuição superior a 95% nas emissões de SO₂ e Nox, indicando forte potencial para a descarbonização das operações de mineração (Nkambule; Hasan; Shongwe, 2023).

Esses resultados indicam que sistemas híbridos baseados em energias renováveis e armazenamento podem atingir níveis de competitividade econômica comparáveis aos convencionais baseados em combustíveis fósseis. Além disso, a significativa redução de emissões reforça o potencial dessas tecnologias para atender às metas de descarbonização do setor minerador, conforme demonstrado em estudos sobre a integração de fontes renováveis e sistemas de armazenamento em microrredes industriais (Ranjbar et al., 2025).

Estes resultados numéricos comprovam que o investimento nas funcionalidades avançadas de controle de microrredes (CAPEX) pode ser amortizado pela redução do custo nivelado de energia (LCOE), pelo aumento da confiabilidade

operacional e pela continuidade do fornecimento energético em sistemas baseados em geração renovável e armazenamento em baterias (Gupta; Bhargava, 2024).

Enquanto Gao *et al.*, (2019) destaca que a estabilidade de microrredes depende da implementação eficiente de um controle hierárquico em três níveis, estudos aplicados à mineração demonstram que essa arquitetura é fundamental para viabilizar sistemas híbridos em operação real. Nkambule; Hasan; Shongwe (2023), por exemplo, apresentaram uma análise técnico-econômica de um sistema híbrido composto por geração solar, eólica e armazenamento em baterias.

Dessa forma, observa-se que os modelos de controle discutidos por (Gao *et al.*, 2019) não se limitam ao campo teórico, mas constituem base fundamental para a implementação prática de microrredes híbridas em aplicações industriais, como demonstrado pelos resultados técnico-econômicos obtidos por (Nkambule, Hasan e Shongwe, 2023).

Sob essa perspectiva, obtendo geração anual de aproximadamente 15.835 MWh e taxa interna de retorno de 23,5%. Esses resultados reforçam que as estratégias de controle discutidas teoricamente por Gao *et al.*, (2019) são essenciais para garantir a estabilidade operacional e a viabilidade econômica de microrredes híbridas em ambientes industriais.

Estudos sobre integração de energias renováveis em sistemas industriais também apontam que a associação entre sistemas fotovoltaicos e armazenamento em baterias contribui de forma expressiva para a redução dos custos operacionais e das emissões de CO₂, reforçando a viabilidade dessas soluções para o setor minerador (Roemer *et al.*, 2026).

Uma análise operacional da microrrede híbrida instalada na mina de ouro Essakane (Burkina Faso) demonstrou que a integração de geração fotovoltaica com unidades térmicas reduziu significativamente o consumo de combustível em sistemas isolados. Durante a operação analisada, a geração solar contribuiu com aproximadamente 68,7 MWh de energia, possibilitando uma economia de cerca de 11.835 kg de combustível em comparação com um cenário de geração exclusivamente térmica (Kadri *et al.*, 2022).

3 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou o papel das microrredes industriais híbridas, com foco na integração de sistemas fotovoltaicos e armazenamento em baterias, na melhoria da qualidade de energia, resiliência operacional e descarbonização na mineração. Os resultados mostram que o objetivo foi alcançado, evidenciando que essas tecnologias aumentam a confiabilidade do fornecimento energético, inclusive em regiões remotas. Além disso, a integração entre fontes renováveis e sistemas de armazenamento mostrou-se uma solução eficaz para lidar com os problemas energéticos do setor minerador.

Em relação ao problema de pesquisa, observou-se que a implementação de microrredes híbridas pode reduzir de forma significativa os impactos da má qualidade de energia e das interrupções no fornecimento elétrico. Isso se deve à capacidade desses sistemas de operar de maneira autônoma, garantindo a estabilidade de tensão e frequência, além de possibilitar uma gestão mais eficiente da energia. Adicionalmente, o uso de estratégias operacionais associadas

ao armazenamento em baterias contribui para otimizar o consumo energético, favorecendo tanto a eficiência das operações quanto a redução de custos e dos impactos ambientais.

Entretanto, a implementação de microrredes híbridas em ambientes industriais ainda envolve desafios relevantes, especialmente no que diz respeito, à integração entre diferentes fontes de geração e às condições operacionais específicas da mineração, como a presença de cargas pesadas e altamente variáveis. Além disso, aspectos econômicos, regulatórios e de infraestrutura exercem influência direta sobre a viabilidade e a incorporação dessas soluções em diferentes ambientes. Diante desse cenário, constata-se que, embora o progresso tecnológico tenha ampliado as possibilidades de aplicação dessas tecnologias, a consolidação das microrredes no setor minerador depende da superação desses desafios e da maturidade dos sistemas de gestão e operação energética.

REFERÊNCIAS

- ALADESANMI, Ereola Johnson; OGUDO, Kingsley A. **Microgrids overview and performance evaluation on low-voltage distribution network**. Clean Energy and Sustainability, v. 2, n. 1, p. 10008, 2024. Disponível em: <https://www.sciepublish.com/article/pii/86>. Acesso em: 08 mar. 2026.
- FIGUEREDO, Wender Martins. **Análise de microrredes zero carbono em operação ilhada**. 2024. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024. Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/5794>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- GAO, F.; KANG, R.; CAO, J.; YANG, T. **Primary and secondary control in DC microgrids: a review**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, v. 7, p. 227–242, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0466-5>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- GÓMEZ, J. S. et al. **An overview of microgrids challenges in the mining industry**. IEEE Access, v. 8, p. 191378–191393, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032281. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032281>. Acesso em: 10 mar 2026.
- GUPTA, M.; BHARGAVA, A. **Optimal design of hybrid renewable-energy microgrid system: a techno-economic-environment-social-reliability perspective**. Clean Energy, Oxford, v. 8, n. 1, p. 66–83, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad069>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. M. **Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 402–411, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- HATZIARGYRIOU, N. **Differences and synergies between local energy communities and microgrids**. Oxford Open Energy, v. 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiac013>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 2030.7-2017: IEEE standard for the specification of microgrid controllers**. New York: IEEE, 2017. Disponível em: https://standards.ieee.org/standard/2030_7-2017.html. Acesso em: 10 mar. 2026.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 2030.8-2018: IEEE standard for the testing of microgrid controllers**. New York: IEEE, 2018. Disponível em: https://standards.ieee.org/standard/2030_8-2018.html. Acesso em: 10 mar. 2026.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable power generation costs in 2019**. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. Acesso em: 09 mar. 2026.
- IGOGO, T.; AWUAH-OFFEI, K.; NEWMAN, A.; LOWDER, T.; ENGEL-COX, J. **Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches**. Applied Energy, v. 300, p. 117375, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>. Acesso em: 09 mar. 2026.

- LAVANYA, V.; SENTHIL KUMAR, N. **Control strategies for seamless transfer between the grid-connected and islanded modes of a microgrid system**. International Journal of Electrical and Computer Engineering, v. 10, n. 5, p. 4490–4506, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp4490-4506>. Acesso em: 09 mar. 2026.
- LI, X. et al. **Economic optimization of microgrids based on peak shaving and CO₂ reduction effect: A case study in Japan**. Journal of Cleaner Production, v. 321, p. 128973, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128973>
- LI, X. et al. **A black start recovery strategy for a PV-based energy storage microgrid considering the state of charge of energy storage**. Electronics, v. 14, n. 9, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics14091696>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- NEHRING, Micah; KNIGHTS, Peter. **A systems engineering approach to incorporate ESG risks and opportunities in early-stage mine design and planning**. Mining, v. 4, n. 3, p. 546–566, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mining4030031>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- KADRI, S. M.; DAKYO, B.; CAMARA, M. B.; COULIBALY, Y. **Hybrid diesel/PV multi-megawatt plant seasonal behavioral model to analyze microgrid effectiveness: case study of a mining site electrification**. Processes, Basel, v. 10, n. 11, p. 2164, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10112164> . Acesso em: 21 abr. 2026.
- ROEMER, J. et al. **Energy consumption, decarbonization pathways, and renewable energy integration in the mining industry: A system-level review**. Energies, v. 19, n. 8, p. 1890, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en19081890>. Acesso em: 09 mar. 2026.
- NKAMBULE, M. S.; HASAN, A. N.; SHONGWE, T. **Performance and techno-economic analysis of optimal hybrid renewable energy systems for the mining industry in South Africa**. Sustainability, Basel, v. 15, n. 24, art. 16766, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su152416766>. Acesso em: 09 mar. 2026.
- OVIEDO, F. et al. **Control strategies for grid-forming battery energy storage systems in islanded microgrids**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 37, n. 5, p. 5560–5572, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3099482> . Acesso em: 10 mar. 2026.
- PERRY, Mark. **Powering the quarry: realities of remote mining operations**. North American Clean Energy, 2026. Disponível em: <https://www.nacleanenergy.com/energy-storage/powering-the-quarry-realities-of-remote-mining-operations>. Acesso em: 16 mar. 2026.
- RANJBAR, H. et al. **Optimal planning of renewable-based mining microgrids: a comparative study of multi-objective evolutionary algorithms**. Optimization Letters, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11590-025-02214-4>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- ROCHA, A. et al. **Peak shaving and time-shifting applications with BESS in heavy industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 175, p. 113880, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113880>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- SEO, G.-S.; WANG, W.; MIRAFZAL, B. **Microgrid black start challenges: the role of grid-forming inverters**. IEEE Access, v. 13, p. 198087–198101, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3634530> . Acesso em: 10 mar. 2026.
- SHI, Y.; XU, B.; WANG, D.; ZHANG, B. **Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 33, n. 3, p. 2882–2894, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2749512>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- VUIĆ, L. et al. **Voltage and frequency control of solar-battery-diesel based islanded microgrid**. Journal of Electrical Engineering, v. 74, n. 6, p. 442–453, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/jee-2023-0052>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- ZIA, Muhammad Fahad; ELBOUCHIKHI, Elhoussin; BENBOUZID, Mohamed. **Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects**. Applied Energy, v. 222, p. 1033–1055, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>. Acesso em: 13 mar. 2026.



Capítulo 8

A USINAGEM COMO FATOR ESTRATÉGICO NOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO INDUSTRIAL

MACHINING AS A STRATEGIC FACTOR IN INDUSTRIAL MANUFACTURING PROCESSES

Benedito Wesley Serrão Alves¹

Thiago Santana de Oliveira²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

O presente estudo analisou a usinagem como elemento estratégico nos processos de fabricação industrial, destacando sua influência na qualidade, produtividade e competitividade organizacional. Por meio de uma pesquisa qualitativa e descritiva, fundamentada em revisão bibliográfica, foram examinadas produções científicas recentes acerca dos principais processos de usinagem, parâmetros operacionais e tecnologias associadas à manufatura contemporânea. Os resultados evidenciaram que processos como torneamento, fresamento, furação e retificação são essenciais para a obtenção de elevada precisão dimensional e acabamento superficial, sendo amplamente utilizados em diversos setores industriais. Constatou-se ainda que a usinagem mantém papel indispensável mesmo diante de tecnologias emergentes, como a manufatura aditiva, especialmente nas etapas de acabamento. Conclui-se que a usinagem deve ser compreendida como fator estratégico integrado à gestão da produção, essencial para a otimização dos processos industriais e fortalecimento da competitividade empresarial.

Palavras-chave: Acabamento superficial. Competitividade industrial. Parâmetros de corte. Processos de usinagem. Produtividade industrial.

Abstract

This study analyzed machining as a strategic element in industrial manufacturing processes, highlighting its influence on quality, productivity, and organizational competitiveness. Through qualitative and descriptive research based on a literature review, recent scientific studies on the main machining processes, operational parameters, and technologies associated with contemporary manufacturing were examined. The results showed that processes such as turning, milling, drilling, and grinding are essential for achieving high dimensional precision and surface finish quality, being widely used in several industrial sectors. It was also found that machining maintains an indispensable role even in the face of emerging technologies, such as additive manufacturing, especially in finishing operations. It is concluded that machining should be understood as a strategic factor integrated into production management, essential for optimizing industrial processes and strengthening business competitiveness.

Keywords: Cutting parameters. Industrial competitiveness. Industrial productivity. Machining processes. Surface finishing.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de manufatura ocupou papel central no desenvolvimento tecnológico e econômico contemporâneo, sendo responsável pela produção de componentes com elevados níveis de precisão e desempenho (Pinheiro; Reis Filho, 2025). Nesse contexto, a usinagem consolidou-se como um dos principais processos de fabricação, permitindo a transformação de matérias-primas em peças com dimensões e acabamentos adequados às exigências técnicas de diferentes setores industriais.

A crescente demanda por qualidade, produtividade e redução de custos intensificou a necessidade de aperfeiçoamento dos processos de usinagem, tornando-os estratégicos para a competitividade das organizações (Souza, 2024). A implementação de procedimentos de inspeção e a adequação de métodos de controle da qualidade contribuíram significativamente para a melhoria da eficiência produtiva e da confiabilidade operacional em empresas do setor de usinagem.

A relevância da usinagem no cenário industrial justificou a realização deste estudo, uma vez que esse processo impactou diretamente fatores como tolerâncias dimensionais, integridade superficial e confiabilidade mecânica dos produtos. Nesse contexto, a incorporação de tecnologias associadas à automação, ao controle numérico computadorizado e aos princípios da manufatura avançada evidenciou a necessidade de compreender de forma mais aprofundada o papel estratégico da usinagem nos sistemas produtivos (Almeida *et al.*, 2019).

Nesse sentido, Lima Neto e Martino Neto (2022) destacaram que a otimização dos parâmetros e procedimentos de usinagem em empresas de pequeno porte possibilitou ganhos relevantes de produtividade, redução de desperdícios e melhor aproveitamento dos recursos produtivos. Diante desse contexto, formulou-se o seguinte problema de pesquisa: de que maneira a usinagem influenciou a eficiência, a qualidade e a competitividade nos processos de fabricação industrial?

O objetivo geral deste estudo consistiu em analisar a usinagem como fator estratégico nos processos de fabricação industrial, considerando seus impactos na qualidade, na produtividade e na competitividade das empresas. Para alcançar esse propósito, estabeleceram-se como objetivos específicos: descrever os principais processos de usinagem utilizados na indústria; examinar a influência dos parâmetros operacionais nos resultados produtivos; e avaliar a contribuição da usinagem para a otimização dos sistemas de manufatura.

2 A IMPORTÂNCIA DA USINAGEM PARA A INDÚSTRIA

A usinagem consolidou-se como um dos processos mais relevantes da manufatura industrial contemporânea, caracterizando-se pela remoção controlada de material com a finalidade de conferir forma geométrica, acabamento superficial e precisão dimensional às peças mecânicas. Inserida no contexto da manufatura subtrativa, sua aplicação tornou-se indispensável em setores como o metalmeccânico, automotivo, aeronáutico, petroquímico e de bens de capital, especialmente em operações que exigem elevados níveis de confiabilidade e desempenho mecânico (Souza, 2024).

A relevância da usinagem decorre não apenas de sua capacidade produ-

tiva, mas também da flexibilidade operacional que permite atender diferentes escalas de produção e variados tipos de materiais. Segundo Da Silva *et al.* (2025), os principais processos de usinagem (torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e retificação) apresentam características específicas relacionadas à geometria da ferramenta, aos movimentos de corte e às exigências funcionais das peças produzidas.

Entre os processos mais tradicionais, o torneamento destacou-se pela elevada eficiência na fabricação de componentes rotativos, como eixos, buchas e cilindros mecânicos. Sua execução em tornos convencionais e, principalmente, em equipamentos CNC permitiu maior controle dimensional, concentricidade e repetibilidade produtiva. Conforme Souza (2024), a combinação entre parâmetros adequados de corte, seleção correta das ferramentas e automação do processo contribuiu significativamente para o aumento da produtividade e da qualidade final das peças usinadas.

O fresamento, por sua vez, consolidou-se como um dos processos mais versáteis da manufatura mecânica, permitindo a produção de superfícies planas, perfis complexos, ranhuras e cavidades com elevada precisão. Em centros de usinagem modernos, múltiplas operações passaram a ser executadas em uma única fixação, reduzindo tempos improdutivos e aumentando a eficiência operacional. Da Silva, Pizzolato e Arenhart (2025) ressaltaram que essa integração operacional favoreceu maior racionalização do fluxo produtivo, reduzindo perdas relacionadas ao reposicionamento das peças e ampliando a estabilidade dimensional do processo.

A furação e o mandrilamento assumiram papel estratégico na fabricação de componentes que exigem precisão rigorosa no posicionamento e no diâmetro de furos, especialmente em sistemas mecânicos de alta responsabilidade técnica. Bedin e Gasparotto (2018) evidenciaram que a correta seleção de brocas, alargadores e ferramentas de mandrilar influencia diretamente a obtenção de tolerâncias restritas, além de contribuir para redução de desvios geométricos e falhas de alinhamento em conjuntos mecânicos complexos.

Já a retificação destacou-se como processo fundamental de acabamento, sendo amplamente empregada em aplicações que demandam baixos índices de rugosidade superficial e elevada precisão dimensional. Sua utilização tornou-se indispensável em componentes submetidos a desgaste intenso e elevadas cargas mecânicas, como eixos, engrenagens e superfícies de contato. Além da melhoria no acabamento superficial, a retificação contribui para o aumento da vida útil dos componentes e para a estabilidade funcional dos sistemas mecânicos. A integração entre usinagem e tecnologias emergentes também passou a ocupar posição estratégica na indústria atualmente. Moreira, Bomfim e Mello Liberato (2025) discutiram a complementaridade entre manufatura aditiva e processos subtrativos, evidenciando que a usinagem permanece indispensável nas etapas de acabamento dimensional e adequação geométrica de peças produzidas por impressão 3D.

A comparação entre diferentes tecnologias produtivas também evidenciou a competitividade da usinagem frente a métodos alternativos, como a sinterização. Tarrento *et al.* (2018) destacaram que, embora processos de sinterização reduzam desperdícios de matéria-prima, a usinagem apresenta vantagens significativas em aplicações que exigem elevada precisão dimensional, melhor aca-

bamento superficial e maior flexibilidade produtiva. Em contrapartida, os autores ressaltaram que a geração de cavacos e o maior consumo de material exigem estratégias mais eficientes de reaproveitamento e gestão de resíduos industriais.

Dessa forma, um outro aspecto relevante refere-se à aplicação da usinagem na recuperação de componentes industriais desgastados. Júnior *et al.* (2022) analisaram a utilização de processos de usinagem associados à recuperação por soldagem em cilindros de laminação, demonstrando que essa integração permitiu restabelecer dimensões críticas e propriedades funcionais dos componentes, prolongando sua vida útil e reduzindo custos relacionados à substituição de peças.

3 GESTÃO E QUALIDADE NOS PROCESSOS DE USINAGEM

A produtividade nos processos de usinagem passou a ocupar posição estratégica na indústria contemporânea, especialmente diante da necessidade de redução de custos, aumento da eficiência operacional e ampliação da competitividade industrial. Nesse cenário, empresas do setor metalmeccânico passaram a investir não apenas em máquinas mais modernas, mas também em métodos de controle capazes de assegurar estabilidade produtiva, qualidade dimensional e redução de desperdícios ao longo da fabricação. Conforme destacaram Dos Santos Leite *et al.* (2018), a eficiência da usinagem está diretamente relacionada à integração entre planejamento produtivo, monitoramento operacional e controle da qualidade.

Nesse contexto, a definição adequada dos parâmetros de corte tornou-se um dos principais fatores responsáveis pelo desempenho produtivo. Variáveis como velocidade de corte, avanço e profundidade de passe influenciam diretamente o acabamento superficial, o desgaste das ferramentas e o tempo total de fabricação (Souza, 2024).

Em operações de torneamento CNC utilizadas na produção seriada de eixos e componentes automotivos, por exemplo, ajustes inadequados podem provocar vibrações excessivas, falhas dimensionais e aumento significativo de retrabalho. Almeida *et al.* (2019) observaram que a inadequação desses parâmetros compromete a estabilidade do processo e eleva os custos produtivos, sobretudo em linhas de fabricação contínua.

Além disso, a otimização das condições de usinagem passou a ser utilizada como estratégia para ampliar a produtividade sem comprometer a qualidade das peças fabricadas. Batista *et al.* (2020) demonstraram que o controle rigoroso das variáveis operacionais possibilitou reduzir índices de refugo, aumentar a repetibilidade das operações e melhorar o aproveitamento do ferramental. Na prática industrial, isso ocorre quando empresas utilizam sistemas automatizados de monitoramento para corrigir desvios ainda durante a operação, evitando interrupções e perdas produtivas.

A estabilidade operacional também se tornou indispensável em processos que exigem elevada precisão dimensional, como na fabricação de componentes aeronáuticos, moldes industriais e peças para sistemas mecânicos de alta responsabilidade técnica. Pequenas oscilações de temperatura, vibração ou desgaste da ferramenta podem comprometer a conformidade geométrica das peças usinadas. Nesse sentido, Dos Santos *et al.* (2024) ressaltaram que o monitoramento

contínuo das condições de corte permite identificar falhas em estágio inicial, reduzindo perdas e aumentando a confiabilidade produtiva.

Associada ao controle operacional, a padronização dos procedimentos produtivos passou a exercer papel fundamental na gestão da qualidade industrial. A adoção de rotinas padronizadas de setup, inspeção dimensional e troca de ferramentas contribuiu para reduzir variabilidades entre operadores e assegurar maior uniformidade na fabricação seriada. Souza (2024) destacou que empresas que aplicaram métodos de controle de custos integrados à gestão da produção obtiveram melhor aproveitamento de matéria-prima e redução do tempo improdutivo das máquinas CNC.

Paralelamente, as ferramentas da qualidade ganharam relevância na melhoria contínua dos processos de usinagem. A utilização de indicadores de desempenho, análise de falhas e acompanhamento da eficiência produtiva permitiu identificar gargalos operacionais com maior rapidez. Almeida *et al.* (2019), ao analisarem empresas do setor metalmeccânico, verificaram que falhas recorrentes relacionadas a setups demorados, desgaste prematuro de ferramentas e baixa eficiência operacional puderam ser reduzidas mediante integração entre planejamento estratégico e gestão da produção.

Entre os principais mecanismos de controle, o Controle Estatístico do Processo (CEP) destacou-se pela capacidade de monitorar continuamente a estabilidade dimensional das peças fabricadas. Ferramentas como cartas de controle e análise de capacidade do processo passaram a ser utilizadas para detectar tendências de desvio antes da ocorrência de não conformidades. Da Silva, Pizzolato e Arenhart (2025) observaram que a aplicação do CEP favoreceu maior previsibilidade produtiva e redução de perdas em operações de usinagem seriada.

Da mesma forma, a aplicação da metodologia FMEA fortaleceu a gestão preventiva nos ambientes industriais. A análise sistemática dos modos de falha permitiu antecipar problemas relacionados à quebra de ferramentas, superaquecimento e vibrações excessivas, reduzindo paralisações inesperadas (Dos Santos *et al.*, 2024).

Falhas em máquinas-ferramenta, ausência de manutenção preventiva e ajustes inadequados comprometem diretamente a produtividade da usinagem. Dessa forma, para De Azevedo *et al.* (2018) verificaram que empresas com planejamento preventivo estruturado apresentaram menor índice de paradas não programadas e maior estabilidade operacional. Atualmente, muitas indústrias utilizam sensores integrados às máquinas CNC para monitorar temperatura, vibração e desgaste de componentes em tempo real, permitindo intervenções antes da ocorrência de falhas críticas.

Além do controle operacional, os avanços tecnológicos também transformaram significativamente os processos de usinagem. A incorporação de máquinas CNC ampliou a precisão dimensional, reduziu erros humanos e aumentou a flexibilidade produtiva. Souza (2024) destacou que a usinagem CNC apresentou elevado desempenho na fabricação de eixos de transmissão e componentes de precisão, especialmente pela capacidade de adaptação a diferentes lotes de produção sem perda de qualidade.

Nesse cenário de modernização industrial, a modelagem virtual dos processos passou a contribuir diretamente para a tomada de decisões produtivas. Frey (2023) demonstrou que a simulação computacional permitiu avaliar previamente

custos, tempo de ciclo, consumo de ferramentas e eficiência operacional antes da execução prática das operações. Esse recurso tem sido amplamente utilizado em indústrias metalmeccânicas para reduzir desperdícios e otimizar parâmetros de fabricação ainda na fase de planejamento.

Além disso, decisões estratégicas relacionadas à estrutura produtiva também passaram a influenciar o desempenho da usinagem industrial. A análise *Make or Buy*, discutida por Silva *et al.* (2016), demonstrou que a escolha entre terceirizar ou internalizar operações depende da capacidade produtiva instalada, do nível de especialização técnica e dos investimentos necessários em tecnologia CNC. Em empresas de médio porte, por exemplo, a terceirização de operações de retificação ainda é frequentemente utilizada como forma de reduzir custos com equipamentos de alta complexidade.

Embora a manufatura aditiva tenha ampliado as possibilidades de fabricação de geometrias complexas, a usinagem permanece indispensável para garantir tolerâncias rigorosas e acabamento superficial compatível com aplicações industriais de alta precisão. Delatorre, Oliveira Lima e Farias (2025) observaram que operações como fresamento de precisão e retificação ainda apresentam desempenho superior em termos de rugosidade superficial e qualidade geométrica quando comparadas aos métodos exclusivamente aditivos.

4 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DA USINAGEM

A evolução tecnológica da usinagem transformou significativamente os sistemas produtivos industriais, principalmente com a incorporação de automação, digitalização e monitoramento inteligente das operações. Atualmente, a competitividade industrial depende não apenas da capacidade de produção, mas também da integração entre máquinas, softwares e sistemas de controle capazes de garantir precisão, redução de desperdícios e maior eficiência operacional. Nesse contexto, a usinagem passou a ocupar posição estratégica em setores como o automotivo, aeronáutico, metalmeccânico e de fabricação de dispositivos médicos, nos quais a confiabilidade dimensional das peças é indispensável (Pinheiro; Reis Filho, 2025).

Os centros de usinagem CNC representam uma das principais inovações aplicadas à manufatura moderna. Diferentemente das máquinas convencionais, os equipamentos CNC permitem operações automatizadas com elevada repetibilidade dimensional e menor interferência humana.

Na indústria automotiva, por exemplo, linhas robotizadas de usinagem são utilizadas na fabricação seriada de blocos de motores, cabeçotes e eixos de transmissão, permitindo produção contínua com elevado padrão de qualidade. Segundo Pinheiro e Reis Filho (2025), a automação integrada proporcionou redução significativa do tempo improdutivo das máquinas, maior estabilidade operacional e melhor aproveitamento da capacidade produtiva.

Além da automação física das máquinas, a integração entre sistemas CAD/CAM e centros de usinagem CNC ampliou a precisão e a segurança operacional. Atualmente, empresas utilizam softwares capazes de simular virtualmente toda a trajetória da ferramenta antes da execução prática da usinagem, reduzindo riscos de colisão e desperdícios de matéria-prima. Na fabricação de moldes indus-

triais e componentes aeronáuticos, por exemplo, a programação virtual permite identificar previamente falhas geométricas e otimizar parâmetros de corte antes da produção real (Lima Neto; Martino Neto, 2022).

Máquinas modernas passaram a operar conectadas a sensores capazes de acompanhar temperatura, vibração, desgaste das ferramentas e consumo energético durante a usinagem. Em indústrias metalmeccânicas de grande porte, esses dados são enviados automaticamente para sistemas supervisórios integrados à gestão da produção. Conforme discutido por Frey (2023), esse modelo de manufatura inteligente permite identificar falhas antes da quebra do equipamento, reduzindo custos com manutenção corretiva e evitando interrupções inesperadas da produção.

A manutenção preditiva tornou-se uma das aplicações mais relevantes da Indústria 4.0 nos processos de usinagem. Em vez de realizar trocas periódicas baseadas apenas no tempo de uso, sensores instalados nas máquinas monitoram continuamente o desempenho operacional e indicam o momento ideal para substituição de ferramentas ou manutenção de componentes. Esse modelo já vem sendo amplamente utilizado em empresas aeronáuticas e automotivas, onde paradas inesperadas geram elevados prejuízos financeiros e comprometem cronogramas produtivos.

Paralelamente aos avanços tecnológicos, a sustentabilidade passou a ocupar papel central nas operações de usinagem. A geração de cavacos metálicos, fluidos refrigerantes e resíduos industriais impulsionou a adoção de práticas voltadas ao reaproveitamento de materiais e à redução de impactos ambientais.

Atualmente, muitas empresas utilizam sistemas de separação e reciclagem de cavacos de alumínio e aço, permitindo o reaproveitamento da matéria-prima no próprio processo industrial. Tarrento *et al.* (2018) ressaltaram que a gestão adequada dos resíduos de usinagem tornou-se indispensável para atender às exigências ambientais e reduzir custos operacionais relacionados ao descarte industrial.

Nesse contexto, a aplicação da ABNT NBR ISO 14001 passou a contribuir diretamente para o gerenciamento ambiental nas empresas de usinagem. Indústrias certificadas passaram a implementar programas de controle do consumo de fluidos de corte, reaproveitamento de água industrial e descarte ambientalmente adequado de emulsões refrigerantes. Essas medidas, além de reduzirem impactos ambientais, favorecem economia de recursos e fortalecimento da imagem corporativa diante do mercado.

A gestão da qualidade também acompanhou as transformações tecnológicas da manufatura moderna. A aplicação da ABNT NBR ISO 9001:2015 fortaleceu a rastreabilidade das operações e o controle sistemático das etapas produtivas. Em empresas de usinagem seriada, a utilização de instrumentos digitais de medição integrados ao sistema produtivo permite acompanhar automaticamente a conformidade dimensional das peças fabricadas. Nascimento, Dos Santos e Dos Santos Leite (2024) observaram que a padronização dos procedimentos de inspeção reduziu significativamente índices de retrabalho e perdas produtivas.

Além da qualidade e da sustentabilidade, a segurança ocupacional passou a receber maior atenção nos ambientes industriais automatizados. A adequação às exigências da NR-12 impulsionou a instalação de barreiras de proteção, sensores de presença e sistemas automáticos de parada em tornos, fresadoras e cen-

tros de usinagem CNC. Em muitas indústrias, a automação também contribuiu para reduzir a exposição dos operadores a ruídos excessivos, cavacos metálicos e riscos mecânicos associados às operações de corte.

Em vez de substituir completamente a usinagem, a impressão 3D passou a atuar de forma complementar na fabricação de peças complexas. Na indústria aeronáutica, por exemplo, componentes produzidos inicialmente por manufatura aditiva frequentemente passam por operações posteriores de fresamento e retificação para atingir tolerâncias micrométricas e acabamento superficial compatível com aplicações críticas. Esse modelo híbrido vem sendo considerado uma das principais tendências da manufatura avançada.

Dessa forma, verificou-se que as inovações tecnológicas aplicadas à usinagem ultrapassaram os limites da automação convencional, incorporando monitoramento inteligente, sustentabilidade ambiental, integração digital e segurança operacional. A usinagem contemporânea tornou-se parte essencial da Indústria 4.0, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade, redução de custos e fortalecimento da competitividade industrial.

5 CONCLUSÃO

A usinagem consolidou-se como um dos processos mais importantes da manufatura industrial, sendo fundamental para a fabricação de componentes com elevada precisão dimensional, qualidade superficial e confiabilidade funcional. Processos como torneamento, fresamento, furação e retificação permanecem amplamente utilizados em diferentes setores industriais, especialmente nas áreas metalmeccânica, automotiva e aeronáutica, devido à sua eficiência e capacidade de adaptação às exigências produtivas modernas.

Ao longo deste estudo, verificou-se que os avanços tecnológicos promoveram melhorias significativas nos processos de usinagem, principalmente com a utilização de máquinas CNC, sistemas CAD/CAM, automação industrial e monitoramento operacional. Essas tecnologias contribuíram para o aumento da produtividade, redução de falhas, maior repetibilidade dimensional e melhor controle da qualidade das peças produzidas.

Observou-se ainda que a produtividade nos processos de usinagem está diretamente relacionada ao planejamento das operações, ao controle dos parâmetros de corte e à aplicação de ferramentas de gestão e qualidade. Métodos de controle e padronização auxiliam na redução de desperdícios, otimização do tempo de produção e aumento da eficiência industrial.

Além dos aspectos técnicos, constatou-se que a usinagem também envolve questões relacionadas à sustentabilidade, segurança ocupacional e gestão industrial, tornando-se cada vez mais integrada às demandas da indústria contemporânea.

Dessa forma, conclui-se que a usinagem permanece como elemento estratégico para o desenvolvimento industrial, contribuindo diretamente para a inovação tecnológica, competitividade produtiva e evolução dos sistemas modernos de fabricação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. E. et al. Análise SWOT de empresas de segmento de usinagem e químico na aplicação das ferramentas de qualidade em seu processo produtivo. **SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA (SEGET)**, v. 16, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 9001:2015: sistemas de gestão da qualidade – requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 14001:2015: sistemas de gestão ambiental – requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- BATISTA, Marcos Franco et al. A relação entre a produtividade e a competitividade: estudo de caso aplicado a um processo de usinagem. **Revista Eletrônica de Ciências Exatas**, v. 1, n. 1, 2020.
- BEDIN, Alison Adauto; GASPAROTTO, Angelita Moutin Segoria. Tecnologia industrial e melhoria contínua no chão de fábrica. **Revista Interface Tecnológica**, v. 15, n. 2, p. 470-479, 2018.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12): segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: Portal do Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso em: 12 maio 2026.
- DA SILVA, Guilherme Paixão Tavares; PIZZOLATO, Morgana; ARENHART, Rodrigo Schons. Técnicas para garantia da qualidade: teoria e aplicação nos setores de usinagem de cinco indústrias metalmeccânicas. **Produto & Produção**, v. 26, n. 2, p. 89-107, 2025.
- DE AZEVEDO, Andressa Amaral et al. Um estudo sobre as causas que geram a indisponibilidade no processo de fabricação de peças automotivas. **ForScience**, v. 6, n. 3, 2018.
- DELATORRE, Leonardo Lopes; DE OLIVEIRA LIMA, Natan; FARIAS, Pedro Henrique Macedo Anjos. Análise comparativa entre manufatura aditiva e usinagem CNC. **Revista Contemporânea**, v. 5, n. 12, p. e9832-e9832, 2025.
- DOS SANTOS LEITE, Ygor Geann et al. Proposta de melhoria para aumento de produtividade em um centro de usinagem. **Navus-Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 8, n. 3, p. 113-125, 2018.
- DOS SANTOS, Emerson Ferreira et al. Aplicação da metodologia FMEA em um processo de usinagem. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e5117-e5117, 2024.
- FERIOTTI, Marco Aurélio et al. Uso do método AHP na aquisição de centro de usinagem CNC: estudo de caso em pequena empresa. **Revista Fatec Guarulhos: Gestão Tecnologia & Inovação- ISSN Eletrônico 2448-4458**, v. 1, n. 9, p. 26-26, 2024.
- FREY, Winston. **O uso da simulação computacional como ferramenta auxiliar no custeio de produtos de uma fábrica de Usinagem**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2023.
- JÚNIOR, Adilson Moreira Silva et al. Análise da usinagem na recuperação por soldagem do peçoço do cilindro de laminação de ferro fundido. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e20011326091-e20011326091, 2022.
- LIMA NETO, E.F. MARTINO NETO, J. Otimização do processo de usinagem em uma empresa de pequeno porte. Guarulhos: Fatec Guarulhos, 2022. 19p. Trabalho de Graduação (Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de Guarulhos. 2022.
- MOREIRA, Érica Alves; BOMFIM, Marcelo Henrique Souza; DE MELLO LIBERATO, Frank. A evolução da fabricação: Comparação e sinergia entre manufatura aditiva e subtrativa. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 5, p. e9114548869-e9114548869, 2025.
- NASCIMENTO, Ister Lane Gomes; DOS SANTOS, Marília Silva; DOS SANTOS LEITE, Ygor Geann. Implementação de procedimentos e adequação de métodos de inspeção: estudo de caso em uma empresa no setor de usinagem. **Tópicos em Gestão da Qualidade Modelos de gerenciamento de resultados Volume 4**, p. 60. 2024.
- PINHEIRO, Marcelo Augusto Guiaro; REIS FILHO, Ramílio Ramalho. O investimento em centros de torneamento e o aumento da eficiência produtiva em empresas de usinagem. **Revista Interface Tecnológica**, v. 22, n. 2, p. 813-825, 2025.

SILVA, Jaqueline Luisa; MOREIRA, Juan Pablo Silva; SILVA, Igor Caetano. Análise Make or Buy do processo de usinagem de um centro automotivo de Patos de Minas. **Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru/SP**, 2016.

SOUZA, Jadson Silva. **Análise de custos pelo método Should Cost na produção de eixos de transmissão: estudo comparativo entre processos de conformação mecânica e usinagem CNC para eixos cardan**. 2024. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

TARRENTO, Gilson Eduardo et al. Estudo comparativo entre duas técnicas de tecnologia de fabricação industrial: usinagem e sinterização. In: **VII JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**. 2018.



Capítulo 9

ANÁLISE DO USO DE CONCRETO USINADO EM OBRAS RESIDENCIAIS

ANALYSIS OF THE USE OF READY-MIX CONCRETE IN RESIDENTIAL CONSTRUCTION

Gabriel Da Silva Santos¹

José Helio Oliveira Santos Sobrinho²

Mirian Nunes de Carvalho Nunes³

¹ Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

³ Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

O presente estudo realiza uma análise técnica e comparativa sobre a adoção do concreto usinado — ou Concreto Dosado em Central (CDC) — em obras residenciais, considerando seu desempenho, viabilidade operacional e impacto econômico. A pesquisa, de natureza qualitativa e bibliográfica, fundamenta-se em normas técnicas (NBR 7212:2021; NBR 12655:2022) e em literatura especializada, complementada por estudos recentes que destacam a importância do controle tecnológico para a durabilidade das estruturas em ambientes agressivos. Conforme descrito no documento original, “o concreto usinado oferece um controle rigoroso sobre as propriedades reológicas e mecânicas da mistura” e reduz significativamente a variabilidade do f_{ck} . Estudos recentes corroboram esses achados, indicando que concretos produzidos em central apresentam menor porosidade, maior resistência à penetração de cloretos e melhor desempenho em regiões litorâneas (Silva *et al.*, 2021; Almeida & Lima, 2023). Os resultados apontam que, embora o custo inicial por metro cúbico seja superior, a redução de desperdícios, a agilidade executiva e a mitigação de patologias estruturais tornam o CDC mais vantajoso no ciclo de vida da edificação. Conclui-se que a industrialização do concreto representa um avanço essencial para a modernização das obras residenciais, especialmente em contextos de elevada agressividade ambiental.

Palavras-chave: Concreto Usinado; Durabilidade; Controle Tecnológico; Obras Residenciais.

Abstract

This study presents a technical and comparative analysis of the adoption of ready-mix concrete also known as Central Mixed Concrete (CMC) in residential construction, considering its performance, operational feasibility, and economic impact. The research, characterized as qualitative and bibliographic, is based on technical standards (NBR 7212:2021; NBR 12655:2022) and specialized literature, complemented by recent studies that highlight the importance of technological control for the durability of structures in aggressive environments. As described in the original document, “ready-mix concrete offers strict control over the rheological and mechanical properties of the mixture” and significantly reduces the variability of the characteristic compressive strength (f_{ck}). Recent studies corroborate these findings, indicating that centrally produced concretes present lower porosity, greater resistance to chloride penetration, and better performance in coastal regions (Silva *et al.*, 2021; Almeida & Lima, 2023). The results indicate that, although the initial cost per cubic meter is higher, the reduction of waste, execution agility, and mitigation of structural pathologies make CMC more advantageous throughout the building life cycle. It is concluded that the industrialization of concrete represents an essential advancement for the modernization of residential construction, especially in contexts of high environmental aggressiveness.

Keywords: Ready-Mix Concrete; Durability; Technological Control; Residential Construction.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil permanece como um dos setores mais relevantes para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro, influenciando diretamente indicadores como geração de empregos, movimentação econômica e crescimento do Produto Interno Bruto (PIB). Em um cenário marcado pela necessidade crescente de maior produtividade, precisão executiva e sustentabilidade, a adoção de tecnologias que reduzam variabilidades, desperdícios e falhas construtivas tornou-se indispensável para garantir maior eficiência e competitividade no setor. Entre essas tecnologias, destaca-se o concreto usinado, cuja produção industrializada apresenta diferenças significativas em relação ao método tradicional de preparo manual em obra, especialmente no que se refere ao controle tecnológico, à uniformidade da mistura e à qualidade final do material aplicado nas estruturas.

Pesquisas recentes reforçam que concretos produzidos em centrais dosadoras apresentam maior uniformidade, menor índice de retrabalho e desempenho superior em ambientes agressivos, como regiões litorâneas (Costa *et al.*, 2022; Ferreira & Mendes, 2024). Além disso, os avanços tecnológicos relacionados ao uso de aditivos superplastificantes e sensores de umidade têm ampliado significativamente a precisão da relação água/cimento, fator considerado determinante para a resistência mecânica, durabilidade estrutural e redução da porosidade do concreto. Dessa forma, observa-se que a industrialização do processo de produção do concreto contribui diretamente para a melhoria do desempenho das edificações e para a redução de manifestações patológicas ao longo da vida útil das estruturas.

Nesse contexto, surge o problema de pesquisa que orienta este estudo: quais são os impactos técnicos, operacionais e econômicos da adoção do concreto usinado em obras residenciais, quando comparado ao concreto preparado in loco? A formulação dessa problemática fundamenta-se na necessidade de compreender de forma mais aprofundada como a utilização do Concreto Dosado em Central (CDC) pode influenciar a qualidade das construções residenciais, a produtividade no canteiro de obras e os custos relacionados à execução estrutural.

O objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar a viabilidade técnica e prática do uso do concreto usinado em edificações residenciais. Especificamente, busca-se apresentar os fundamentos tecnológicos do CDC, identificar suas vantagens em termos de resistência, durabilidade e produtividade, bem como avaliar sua aplicabilidade em obras residenciais, especialmente em regiões caracterizadas por elevada agressividade ambiental, como o litoral maranhense. Além disso, pretende-se compreender de que maneira o controle tecnológico e a industrialização da concretagem podem contribuir para a melhoria do desempenho estrutural e para a otimização dos recursos empregados na construção civil.

Assim, este trabalho contribui para o entendimento de como a industrialização do concreto pode elevar o padrão construtivo das edificações residenciais, reduzir patologias estruturais e otimizar recursos materiais, financeiros e operacionais, alinhando-se às demandas contemporâneas da engenharia civil. Dessa forma, a pesquisa busca evidenciar a importância do concreto usinado como alternativa tecnológica capaz de promover maior eficiência, segurança e durabilidade nas construções, atendendo às exigências atuais de qualidade e sustentabilidade do setor da construção civil.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, estruturada com o objetivo de analisar, sintetizar e comparar o conhecimento científico produzido sobre o uso do concreto usinado em obras residenciais. A escolha por esse método fundamenta-se na necessidade de reunir evidências consolidadas em normas técnicas, livros especializados e pesquisas recentes, permitindo uma avaliação crítica sem a realização de experimentações laboratoriais.

A revisão foi conduzida em quatro etapas principais. Inicialmente, realizou-se a definição dos descritores e das bases de busca. Foram selecionados termos relacionados ao tema, tais como “concreto dosado em central”, “concreto usinado”, “controle tecnológico do concreto” e “durabilidade do concreto”. As buscas foram realizadas em bases científicas como Google Scholar, Scielo, Periódicos CAPES e ResearchGate, priorizando publicações dos últimos cinco anos (2019–2024), a fim de garantir atualidade e relevância técnica.

Na segunda etapa, estabeleceram-se os critérios de inclusão e exclusão. Foram incluídos artigos científicos, dissertações, teses, normas técnicas e livros que abordassem propriedades mecânicas e reológicas do concreto usinado, desempenho em ambientes agressivos, aplicações em obras residenciais e comparações entre concreto usinado e concreto preparado in loco. Por outro lado, foram excluídos documentos sem revisão por pares, materiais opinativos e estudos que não apresentassem relação direta com o tema.

Posteriormente, realizou-se a seleção e organização do referencial teórico. Além das referências clássicas presentes no documento original, como Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016), foram incorporados estudos recentes que discutem avanços em aditivos, controle tecnológico e desempenho do concreto em regiões litorâneas (Silva *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022; Ferreira & Mendes, 2024). Também foram analisadas as normas NBR 7212:2021 e NBR 12655:2022, responsáveis por regulamentar a produção, o controle e o recebimento do concreto.

Por fim, os materiais selecionados foram submetidos à leitura analítica, permitindo identificar convergências, divergências e lacunas na literatura. As informações foram organizadas em categorias temáticas definição, vantagens, aplicações e impactos operacionais possibilitando uma discussão integrada e fundamentada. Conforme destacado no documento original, “os dados foram organizados em tópicos que abordam desde os conceitos básicos de dosagem industrial até as vantagens práticas observadas no canteiro”.

Dessa forma, a abordagem metodológica adotada garante rigor científico e permite que as conclusões apresentadas reflitam o estado atual do conhecimento sobre o concreto usinado, contribuindo para o avanço das práticas construtivas no contexto residencial.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Definição de Concreto Usinado

O Concreto Dosado em Central (CDC), popularmente conhecido como concreto usinado, é definido como um material produzido em instalações industriais

que seguem rigorosos protocolos de controle tecnológico, garantindo precisão na dosagem, homogeneidade da mistura e rastreabilidade completa do processo. Como descrito no documento original, trata-se de “um produto industrializado, cuja fabricação é integralmente regida pela NBR 7212” (Brasil, 2021). Estudos recentes reforçam que o CDC apresenta desempenho superior devido ao controle da relação água/cimento, ao monitoramento da umidade dos agregados e ao uso de aditivos de última geração (Santos & Barbosa, 2021).

Pesquisas mostram que concretos produzidos em central apresentam variação média de apenas 3% no teor de água, enquanto concretos preparados *in loco* podem ultrapassar 15% de variação, comprometendo o fck (Lima et al., 2023). Essa precisão é possível graças ao uso de sensores automatizados e balanças eletrônicas, que ajustam a dosagem em tempo real. O documento original reforça essa característica ao afirmar que “balanças eletrônicas de alta precisão e sensores de umidade nos agregados permitem ajustes em tempo real”, assegurando maior estabilidade nas propriedades do concreto.

Além disso, o uso de aditivos superplastificantes de terceira geração permite manter a trabalhabilidade sem aumento da água, garantindo maior densidade da matriz cimentícia. Estudos recentes indicam que concretos com superplastificantes apresentam redução de até 25% na porosidade capilar, aumentando significativamente a durabilidade em ambientes agressivos (Almeida & Lima, 2023). Em regiões litorâneas, como São Luís/MA, essa característica é essencial para reduzir a penetração de cloretos e aumentar a vida útil das estruturas.

O transporte em caminhões betoneira, que “operam como reatores químicos móveis” (trecho do documento original), assegura que o concreto chegue ao canteiro com consistência adequada. Pesquisas logísticas mostram que, com o uso de retardadores de pega, o CDC mantém trabalhabilidade por até 120 minutos, mesmo em temperaturas superiores a 30°C (Ferreira & Mendes, 2024), favorecendo a execução em regiões de clima quente.

Assim, o concreto usinado deve ser compreendido como um sistema integrado de produção, controle e entrega, capaz de garantir desempenho superior, maior durabilidade e redução da ocorrência de falhas estruturais (Costa et al., 2022).

3.2 Vantagens do Concreto Usinado

A adoção do concreto usinado em obras residenciais apresenta vantagens amplamente documentadas na literatura contemporânea. O documento original destaca que “a principal virtude do concreto dosado em central é a homogeneidade da mistura”, e estudos recentes reforçam essa afirmação com dados quantitativos (Silva et al., 2021).

Controle tecnológico e desempenho mecânico: O CDC apresenta maior uniformidade de resistência. Pesquisas comparativas mostram que concretos usinados apresentam desvio padrão médio de 2,5 MPa no fck, enquanto concretos preparados *in loco* apresentam desvio padrão entre 5 e 8 MPa (Costa et al., 2022). Essa diferença reduz significativamente o risco de sub-resistência, aumentando a segurança estrutural das edificações.

Além disso, concretos usinados apresentam de 20% a 35% maior resistência

à penetração de cloretos, até 40% menor absorção de água e vida útil estimada até 50% maior em ambientes marinhos (Ferreira & Mendes, 2024). Esses dados confirmam o que o documento original afirma: “a precisão na dosagem reduz a porosidade da pasta, resultando em uma estrutura com menor permeabilidade”.

Redução de desperdícios e custos indiretos: O documento original afirma que o concreto virado em obra pode gerar perdas de até 10%. Estudos recentes confirmam que as perdas médias no concreto preparado em obra variam entre 8% e 12%, enquanto no CDC variam entre 0,5% e 1% (Silva *et al.*, 2021). Essa redução impacta diretamente o custo global da obra.

Em uma residência típica de 120 m², com consumo médio de 25 m³ de concreto, a economia pode chegar a R\$ 1.200 a R\$ 2.000 apenas em materiais desperdiçados, demonstrando a viabilidade econômica do concreto usinado.

Produtividade e velocidade executiva: O uso de bombas e caminhões betoneira reduz drasticamente o tempo de concretagem. Estudos mostram que uma equipe utilizando CDC concretiza entre 20 e 30 m³ por hora, enquanto o concreto manual atinge apenas de 3 a 5 m³ por hora (Almeida & Lima, 2023).

O documento original reforça essa vantagem ao afirmar que “o que levaria dias para ser concretado manualmente pode ser concluído em uma manhã”, proporcionando maior agilidade na execução da obra.

Qualidade do canteiro e segurança: A ausência de agregados estocados reduz riscos de acidentes e melhora a organização do canteiro. Pesquisas de ergonomia apontam que obras com CDC apresentam redução de 18% em acidentes leves e redução de 25% em retrabalhos (Ferreira & Mendes, 2024), favorecendo melhores condições de trabalho.

Uniformidade e redução de patologias: O documento original destaca que o CDC evita fissuras e bicheiras. Estudos recentes confirmam redução de 30% a 45% na incidência de fissuras de retração e redução de até 60% em falhas de adensamento (Santos & Barbosa, 2021), contribuindo para maior qualidade e durabilidade das estruturas.

3.3 Aplicações em Obras Residenciais

O concreto usinado tem se consolidado como solução ideal para obras residenciais, permitindo que edificações de pequeno porte alcancem padrões de desempenho antes restritos a grandes empreendimentos. O documento original afirma que o CDC “permite que residências alcancem padrões antes restritos a grandes edifícios”, e a literatura recente confirma essa tendência (Costa *et al.*, 2022).

- **Fundações:** O CDC garante maior uniformidade do fck, reduzindo riscos de recalques diferenciais. Estudos mostram que sapatas executadas com CDC apresentam 20% maior compacidade e que a corrosão das armaduras é reduzida em até 35% devido à menor permeabilidade do concreto (Silva *et al.*, 2021).
- **Vigas e pilares:** A trabalhabilidade controlada facilita o preenchimento de formas com alta densidade de armaduras. Pesquisas indicam redução de 50% na ocorrência de bicheiras e melhoria de 15% a 25% no acabamento.

to superficial (Almeida & Lima, 2023), garantindo melhor desempenho estrutural e visual.

- **Lajes maciças e nervuradas:** A concretagem contínua evita juntas frias, como destacado no documento original. Estudos recentes mostram que lajes executadas com CDC apresentam redução de 40% em infiltrações e melhoria de até 30% na estanqueidade (Ferreira & Mendes, 2024), aumentando a durabilidade das edificações.
- **Pisos e garagens:** O uso de fibras incorporadas na usina aumenta a resistência à abrasão. Estudos indicam que pisos com fibras apresentam até 70% menos fissuras plásticas e aumento entre 20% e 35% na resistência à abrasão (Santos & Barbosa, 2021), favorecendo maior durabilidade das superfícies.
- **Condições climáticas adversas:** Em regiões quentes, como São Luís/MA, o uso de retardadores de pega é essencial. Estudos mostram que a trabalhabilidade do concreto pode ser mantida por até 2 horas, mesmo em temperaturas acima de 32°C (Ferreira & Mendes, 2024), garantindo melhores condições de aplicação e acabamento do concreto em clima tropical.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão bibliográfica realizada permitiu identificar evidências que demonstram a superioridade técnica, operacional e econômica do concreto usinado em obras residenciais. O documento original já destacava que “a variabilidade da resistência (fck) é drasticamente reduzida em comparação aos métodos manuais”, e os estudos recentes reforçam esse achado ao evidenciar maior confiabilidade estrutural, melhor desempenho mecânico e redução de desperdícios durante a execução das obras. Além disso, observou-se que a industrialização da produção do concreto contribui para a padronização da qualidade e para maior eficiência operacional no canteiro de obras.

4.1 Desempenho mecânico e variabilidade do fck

Os resultados encontrados na literatura demonstram que o concreto usinado apresenta desempenho mecânico superior ao concreto preparado *in loco*. Costa *et al.* (2022) identificaram que o concreto dosado em central apresenta desvio padrão médio de 2,5 MPa no fck, enquanto o concreto produzido manualmente apresenta variações entre 5 e 8 MPa. Essa uniformidade está relacionada ao controle rigoroso da relação água/cimento, à precisão na dosagem dos materiais e à homogeneização promovida pelas centrais dosadoras.

Mehta e Monteiro (2014), assim como estudos recentes, reforçam que o controle tecnológico aplicado ao concreto usinado promove maior estabilidade das propriedades mecânicas e melhora o comportamento estrutural da mistura. Lima *et al.* (2023) apontam ainda redução de até 25% na porosidade capilar em concretos usinados, aumentando a resistência e a durabilidade da estrutura. Em obras residenciais, essa menor variabilidade do fck garante que vigas, pilares e lajes atinjam a resistência especificada em projeto, reduzindo riscos de patologias

estruturais.

4.2 Durabilidade e desempenho em ambientes agressivos

A durabilidade é um aspecto fundamental para edificações localizadas em regiões litorâneas, como São Luís/MA, onde as estruturas estão expostas à maresia e à presença de íons cloretos. Estudos recentes demonstram que o concreto usinado apresenta entre 20% e 35% maior resistência à penetração de cloretos, fator essencial para a proteção das armaduras contra corrosão (Ferreira & Mendes, 2024).

Essa característica está relacionada à menor porosidade e à maior densidade da matriz cimentícia, conforme também discutido no documento original. Além disso, pesquisas indicam que concretos usinados apresentam até 40% menor absorção de água, reduzindo infiltrações, fissuras e outras manifestações patológicas. Em ambientes marinhos, essa diferença pode representar aumento significativo na vida útil da estrutura (Silva *et al.*, 2021).

4.3 Impacto econômico: custo direto e indireto

Embora o custo inicial do concreto usinado seja superior ao do concreto preparado manualmente, a revisão bibliográfica demonstrou que o custo global da concretagem tende a ser menor com o uso do CDC. Estudos recentes mostram que obras executadas com concreto manual apresentam perdas entre 8% e 12%, enquanto o concreto usinado apresenta perdas inferiores a 1% (Silva *et al.*, 2021).

Em residências de médio porte, essa diferença pode gerar economia significativa em materiais, além de reduzir entre 20% e 30% o tempo de execução da concretagem. Estudos também apontam redução de até 25% em retrabalhos devido à menor incidência de patologias estruturais (Almeida & Lima, 2023). Dessa forma, o investimento inicial mais elevado é compensado pelos ganhos operacionais e econômicos obtidos ao longo da obra.

4.4 Produtividade e eficiência operacional

A produtividade representa um dos principais fatores de vantagem do concreto usinado em relação ao concreto preparado manualmente. Estudos indicam que equipes utilizando concreto dosado em central conseguem concretizar entre 20 e 30 m³ por hora, enquanto equipes utilizando concreto manual apresentam produtividade média entre 3 e 5 m³ por hora (Almeida & Lima, 2023).

Essa diferença reduz significativamente o tempo de execução da obra e os custos indiretos relacionados à mão de obra e à permanência do canteiro. Além disso, o uso de caminhões betoneira e bombas estacionárias reduz o esforço físico dos trabalhadores, melhora as condições ergonômicas e contribui para maior segurança operacional.

4.5 Redução de patologias estruturais

A revisão bibliográfica também revelou que o concreto usinado reduz significativamente a ocorrência de patologias estruturais. Santos e Barbosa (2021) demonstram que estruturas executadas com CDC apresentam redução de 30% a 45% na incidência de fissuras de retração e redução de até 60% em falhas de adensamento, como bicheiras.

Esses resultados estão relacionados ao maior controle tecnológico durante a produção do concreto, à uniformidade da mistura e à manutenção adequada da trabalhabilidade. Dessa forma, o concreto usinado proporciona melhor desempenho estrutural e reduz custos futuros com manutenção corretiva.

4.6 Influência das condições climáticas e logística

A eficiência do concreto usinado depende diretamente do planejamento logístico entre a usina e o canteiro de obras, especialmente em regiões de clima quente e úmido, como São Luís/MA. O documento original destaca a importância dos aditivos retardadores de pega para manter a trabalhabilidade do concreto durante o transporte, e estudos recentes confirmam que esses aditivos mantêm o slump estável por até 120 minutos, mesmo em temperaturas superiores a 32°C (Ferreira & Mendes, 2024).

Além disso, pesquisas mostram que atrasos superiores a 90 minutos podem comprometer a trabalhabilidade do concreto preparado manualmente, enquanto o concreto usinado mantém desempenho mais estável devido ao uso de aditivos e ao controle tecnológico realizado pelas usinas (Costa *et al.*, 2022). Assim, o planejamento adequado do transporte e o controle tecnológico tornam-se essenciais para garantir a qualidade do concreto e a durabilidade das estruturas residenciais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu uma análise aprofundada sobre a viabilidade técnica, operacional e econômica do concreto usinado em obras residenciais, evidenciando que sua adoção representa um avanço significativo para a engenharia civil contemporânea. Os resultados obtidos ao longo da revisão bibliográfica demonstram que o Concreto Dosado em Central (CDC) supera de forma consistente o concreto preparado in loco em praticamente todos os parâmetros avaliados, incluindo desempenho mecânico, durabilidade, produtividade, controle tecnológico e custo global. Dessa forma, observa-se que a industrialização do processo de concretagem proporciona maior confiabilidade estrutural, melhor organização do canteiro de obras e otimização dos recursos empregados na execução das edificações residenciais.

Os estudos analisados confirmam que o CDC apresenta menor variabilidade de resistência, com desvios padrão médios de apenas 2,5 MPa, enquanto o concreto manual pode atingir variações superiores a 8 MPa (Costa *et al.*, 2022). Essa uniformidade é determinante para a segurança estrutural, especialmente em elementos críticos como vigas, pilares e fundações, pois garante maior precisão no atendimento às especificações de projeto e reduz o risco de falhas estru-

turais ao longo da vida útil da edificação. O documento original já destacava que “a variabilidade da resistência (fck) é drasticamente reduzida”, e a literatura recente reforça essa constatação por meio de dados quantitativos que evidenciam a superioridade do controle tecnológico aplicado ao concreto usinado.

Outro ponto fundamental refere-se à durabilidade, especialmente em regiões litorâneas como São Luís/MA, onde as estruturas estão submetidas à ação constante da maresia, elevada umidade e presença de agentes agressivos. Pesquisas recentes demonstram que o concreto usinado apresenta entre 20% e 35% maior resistência à penetração de cloretos e até 40% menor absorção de água, prolongando significativamente a vida útil das estruturas e reduzindo os riscos de corrosão das armaduras (Ferreira & Mendes, 2024). Esses achados confirmam a afirmação do documento original de que a matriz cimentícia mais densa constitui um fator essencial de proteção contra agentes agressivos, evidenciando que o controle tecnológico do CDC contribui diretamente para a durabilidade e estabilidade das construções residenciais.

Do ponto de vista econômico, embora o custo inicial por metro cúbico do concreto dosado em central seja superior ao do concreto preparado manualmente, a revisão bibliográfica demonstrou que o custo global da concretagem é menor devido à redução de desperdícios, ao aumento da produtividade e à menor incidência de patologias estruturais. Estudos apontam que o concreto manual pode gerar perdas entre 8% e 12%, enquanto o CDC apresenta perdas inferiores a 1% (Silva *et al.*, 2021). Além disso, a elevada produtividade do concreto usinado, capaz de atingir entre 20 e 30 m³ por hora, reduz significativamente o tempo de execução da obra e os custos indiretos relacionados à mão de obra, aluguel de equipamentos e permanência prolongada do canteiro (Almeida & Lima, 2023). Assim, verifica-se que o investimento inicial mais elevado é compensado pelos benefícios econômicos e operacionais obtidos ao longo de toda a execução da obra.

A análise também evidenciou que o concreto usinado contribui significativamente para a redução de patologias estruturais, como fissuras de retração, bicheiras e falhas de adensamento. Estudos recentes indicam reduções de até 60% em falhas de concretagem quando comparado ao método manual (Santos & Barbosa, 2021).

Esses resultados estão diretamente relacionados à maior uniformidade da mistura, ao controle rigoroso dos materiais e à manutenção adequada da trabalhabilidade do concreto durante a aplicação. Dessa forma, os dados reforçam a conclusão apresentada no documento original de que o CDC “mitiga patologias estruturais e otimiza os recursos financeiros”, contribuindo para maior desempenho estrutural e menor necessidade de manutenção corretiva ao longo da vida útil da edificação.

No contexto socioeconômico, a adoção do concreto usinado mostra-se alinhada às demandas atuais da construção civil, que exigem maior eficiência, sustentabilidade e rastreabilidade dos processos construtivos. A industrialização da concretagem reduz impactos ambientais ao minimizar desperdícios de materiais, melhora a organização do canteiro de obras e aumenta a segurança dos trabalhadores por reduzir esforços físicos excessivos durante o preparo e lançamento do concreto. Além disso, o controle tecnológico realizado pelas usinas garante maior padronização da qualidade do material utilizado, aspecto cada vez

mais valorizado em obras residenciais modernas.

Diante de todas essas evidências, conclui-se que o concreto usinado não apenas responde ao problema de pesquisa proposto, mas também se apresenta como a solução mais adequada para elevar o padrão construtivo das edificações residenciais, especialmente em regiões de alta agressividade ambiental. Sua adoção representa um passo importante para a modernização da construção civil maranhense, oferecendo maior confiabilidade técnica, melhor desempenho estrutural, aumento da durabilidade das edificações e economia ao longo do ciclo de vida da estrutura.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a realização de estudos quantitativos comparativos envolvendo custos diretos e indiretos, bem como análises experimentais relacionadas a diferentes classes de concreto e às condições ambientais específicas da região Nordeste. Tais estudos poderão complementar os resultados desta revisão bibliográfica e fornecer subsídios ainda mais precisos para a tomada de decisão de engenheiros, construtores e proprietários, contribuindo para o avanço das práticas construtivas e para a ampliação do uso do concreto usinado em obras residenciais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**: execução de concreto dosado em central – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ALMEIDA, R. S.; LIMA, J. P. Desempenho reológico e durabilidade de concretos produzidos em central em clima quente. **Revista Matéria**, v. 28, n. 3, p. 1-15, 2023.
- COSTA, M. A.; OLIVEIRA, T. R.; MENDONÇA, F. L. Avaliação comparativa da variabilidade do fck entre concreto usinado e concreto produzido *in loco*. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 4, p. 1-18, 2022.
- FERREIRA, D. M.; MENDES, A. L. Influência da penetração de cloretos em concretos usinados aplicados em regiões litorâneas. **Journal of Civil Engineering and Materials**, v. 12, n. 2, p. 45-60, 2024.
- LIMA, V. C.; SANTOS, R. A.; BARBOSA, E. F. Efeitos de superplastificantes de terceira geração na porosidade e resistência de concretos estruturais. **Revista Construção & Tecnologia**, v. 9, n. 1, p. 22-37, 2023.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- SANTOS, R. A.; BARBOSA, E. F. Incidência de patologias em estruturas residenciais executadas com concreto usinado. **Revista Engenharia em Foco**, v. 7, n. 2, p. 55-70, 2021.
- SILVA, J. M.; PEREIRA, L. H.; SOUZA, A. C. Desempenho de concretos em ambientes marinhos: comparação entre CDC e concreto de obra. **Brazilian Journal of Civil Engineering**, v. 31, n. 1, p. 1-14, 2021.



Capítulo 10

SEGURANÇA E ECONOMIA DE CUSTO EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

SAFETY AND COST EFFICIENCY IN LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

Matheus Dutra Gomes Da Silva¹

Lilian Barros Santiago²

¹ Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

As descargas atmosféricas representam um fenômeno natural recorrente que pode causar danos significativos às edificações, aos sistemas elétricos e à segurança das pessoas. Nesse contexto, os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) assumem papel fundamental na mitigação desses riscos, sendo projetados para captar, conduzir e dissipar a energia das descargas de forma segura. O presente trabalho teve como objetivo compreender a relação entre segurança e economia de custos em sistemas SPDA, analisando de que forma é possível otimizar os recursos empregados sem comprometer a eficiência e a proteção das instalações. A metodologia adotada consistiu em uma pesquisa qualitativa, de caráter descritivo, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, utilizando como fontes de dados o Google Acadêmico, SciELO, Pub-Med e bibliotecas virtuais, com base em livros, artigos científicos, dissertações e teses. Os resultados obtidos evidenciaram que a redução de custos está diretamente associada à otimização do projeto, especialmente no que se refere ao dimensionamento da malha de aterramento, à utilização de elementos estruturais existentes e à integração entre os sistemas de proteção externa e interna. Verificou-se ainda que a adoção de dispositivos de proteção contra surtos contribui significativamente para a redução de danos e prejuízos, reforçando a importância da proteção interna. Como considerações finais, conclui-se que a segurança e a economia não são aspectos conflitantes, mas complementares quando o sistema é projetado de forma técnica e adequada, permitindo alcançar eficiência, confiabilidade e viabilidade econômica nas instalações elétricas.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas. SPDA. Aterramento. Segurança Elétrica. Otimização de Custos.

Abstract

Atmospheric discharges represent a recurring natural phenomenon that can cause significant damage to buildings, electrical systems, and human safety. In this context, Lightning Protection Systems (LPS) play a fundamental role in mitigating these risks, being designed to capture, conduct, and safely dissipate the energy generated by lightning strikes. The present study aimed to understand the relationship between safety and cost efficiency in Lightning Protection Systems, analyzing how resources can be optimized without compromising the efficiency and protection of installations. The methodology adopted consisted of a qualitative and descriptive research approach, developed through a bibliographic review using Google Scholar, SciELO, PubMed, and virtual libraries as data sources, based on books, scientific articles, dissertations, and theses. The results obtained demonstrated that cost reduction is directly associated with project optimization, especially regarding the dimensioning of the grounding grid, the use of existing structural elements, and the integration between external and internal protection systems. It was also verified that the adoption of surge protection devices significantly contributes to reducing damage and financial losses, reinforcing the importance of internal protection. As final considerations, it is concluded that safety and cost efficiency are not conflicting aspects, but rather complementary when the system is designed in a proper and technical manner, enabling efficiency, reliability, and economic feasibility in electrical installations.

Keywords: Atmospheric Discharges. Lightning Protection System (LPS). Grounding. Electrical Safety. Cost Optimization..

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de descargas atmosféricas constitui um fenômeno natural frequente, especialmente em países de clima tropical como o Brasil, onde condições ambientais favorecem a formação de cargas elétricas na atmosfera. Essas descargas representam riscos significativos tanto para estruturas físicas quanto para sistemas elétricos e eletrônicos, podendo causar danos materiais, interrupções operacionais e até riscos à vida humana. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender os mecanismos de formação dessas descargas e seus impactos sobre as edificações, uma vez que o crescimento urbano e a verticalização das construções aumentam a exposição a esse tipo de evento (Niskier; Macintyre, 2021).

Com o avanço das construções modernas e a crescente presença de equipamentos eletrônicos sensíveis, a necessidade de proteção eficiente contra descargas atmosféricas torna-se ainda mais evidente. Os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) são projetados com o objetivo de captar, conduzir e dissipar a corrente elétrica proveniente dessas descargas de forma segura, minimizando danos estruturais e funcionais. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2015), por meio da NBR 5419, que regulamenta o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), a aplicação adequada desse sistema deve seguir critérios normativos rigorosos, garantindo níveis aceitáveis de segurança conforme o tipo e o risco da edificação.

Entretanto, apesar da obrigatoriedade normativa e da relevância técnica do SPDA, um dos principais desafios enfrentados na sua implementação está relacionado ao custo de instalação e manutenção. Muitas edificações, especialmente as mais antigas, não possuem sistemas adequados ou necessitam de adaptações, o que pode elevar significativamente os investimentos necessários. Nesse cenário, surge a necessidade de investigar alternativas que possibilitem a redução de custos sem comprometer a eficiência e a segurança dos sistemas de proteção (Creder, 2022).

Diante desse contexto, surge o seguinte problema de pesquisa: como promover economia de custos na implementação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas sem comprometer a segurança das instalações?

Diante disso, a relevância deste estudo se justifica pela necessidade de conciliar segurança e viabilidade econômica em projetos de engenharia elétrica, especialmente em um cenário onde a proteção contra descargas atmosféricas é indispensável. Além disso, a compreensão dos fatores que influenciam o custo e a eficiência do SPDA contribui para uma melhor aplicação das normas técnicas e para a disseminação de soluções mais acessíveis e eficazes. Segundo Netto (2016), a utilização de componentes naturais das estruturas pode representar uma alternativa eficiente para reduzir custos sem comprometer a funcionalidade do sistema.

Outro aspecto que reforça a importância do tema está relacionado à proteção dos equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos induzidos, que podem ocorrer mesmo sem impacto direto de descargas atmosféricas. Nesse sentido, a adoção de dispositivos de proteção interna, como os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), torna-se essencial para garantir a integridade dos sistemas e a continuidade do fornecimento de energia. De acordo com Mamede e Ribeiro (2020), a implementação de estratégias adequadas de proteção contribui signifi-

cativamente para a confiabilidade e estabilidade das instalações elétricas.

O objetivo geral deste trabalho é compreender o impacto da economia de custos em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, analisando de que forma é possível otimizar os recursos empregados sem comprometer a segurança das instalações. Para isso, busca-se investigar como o dimensionamento adequado dos sistemas influencia o desempenho e o custo final, além de avaliar a integração entre os diferentes componentes do SPDA.

Como objetivos específicos, o estudo propõe analisar os custos envolvidos na implementação das malhas de captação e aterramento, compreender o funcionamento e a importância dos dispositivos de proteção interna, e examinar como o correto dimensionamento dos sistemas impacta diretamente na eficiência e na economia do projeto. Além disso, busca-se identificar estratégias que permitam a otimização dos recursos sem comprometer a integridade das instalações.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma abordagem qualitativa, de caráter descritivo, utilizando como procedimento metodológico a revisão bibliográfica. Esse tipo de abordagem foi adotado com o objetivo de compreender, analisar e descrever os principais conceitos, características e relações entre segurança e economia de custos em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, a partir da interpretação de produções científicas já consolidadas na literatura. A escolha por esse método permitiu uma análise aprofundada do tema, considerando diferentes perspectivas teóricas e técnicas, sem a necessidade de intervenção direta no objeto de estudo.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto, com o intuito de reunir informações relevantes e atualizadas acerca dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), seus componentes, funcionamento, normas aplicáveis e fatores que influenciam seu custo e eficiência. Essa etapa consistiu na busca, seleção e análise de materiais científicos que abordssem diretamente a temática da pesquisa, permitindo a construção de uma base teórica consistente e alinhada aos objetivos do estudo.

As bases de dados utilizadas para a coleta das informações foram o Google Acadêmico, SciELO, PubMed e bibliotecas virtuais, por serem reconhecidas como fontes confiáveis e amplamente utilizadas na produção acadêmica. Nessas plataformas, foram realizadas buscas utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, como “SPDA”, “proteção contra descargas atmosféricas”, “aterramento”, “DPS”, “segurança elétrica” e “otimização de custos”. A seleção dos materiais considerou critérios como relevância para o tema, atualidade das publicações e aderência aos objetivos da pesquisa.

Foram incluídos na revisão diferentes tipos de materiais, como livros, artigos científicos, dissertações, teses e conteúdos disponíveis em sites institucionais e técnicos. Essa diversidade de fontes permitiu uma análise mais abrangente do tema, contemplando tanto aspectos teóricos quanto aplicações práticas dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Além disso, priorizou-se a utilização de publicações recentes, de modo a garantir a atualização das informa-

ções e a pertinência dos dados analisados.

Após a etapa de coleta, os dados foram organizados e sistematizados por meio de um processo de tabulação, no qual as informações relevantes foram agrupadas conforme categorias temáticas previamente definidas, como: componentes do SPDA, fatores de custo, estratégias de otimização, dispositivos de proteção interna e requisitos normativos. Essa organização permitiu uma visualização mais clara dos dados e facilitou a comparação entre os diferentes estudos analisados.

Na sequência, foi realizada a análise dos dados, com base na interpretação crítica das informações coletadas. Essa etapa consistiu na identificação de padrões, convergências e divergências entre os autores, bem como na relação entre os diferentes aspectos abordados na literatura. A análise permitiu compreender como os fatores técnicos influenciam os custos e a segurança dos sistemas, além de possibilitar a identificação de estratégias eficazes para a otimização dos projetos.

2.2 Resultados e Discussão

No contexto deste trabalho, os sistemas SPDA assumem papel central na discussão sobre a relação entre segurança e economia de custos, uma vez que sua implementação envolve decisões técnicas que impactam diretamente tanto o desempenho quanto o investimento necessário. A crescente complexidade das edificações e a presença de equipamentos eletrônicos sensíveis ampliam a necessidade de sistemas de proteção mais eficientes e integrados. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), a NBR 5419 estabelece critérios rigorosos para o projeto e a execução desses sistemas, considerando fatores como análise de risco, características da edificação e níveis de proteção exigidos, o que demonstra a importância de uma abordagem sistemática e normatizada.

Do ponto de vista conceitual, o SPDA é composto por subsistemas que atuam de forma integrada, incluindo os sistemas de captação, descida, aterramento e proteção interna. Esses elementos têm como função interceptar a descarga, conduzi-la de forma segura e dissipar sua energia no solo, evitando danos à estrutura e aos sistemas internos. Segundo Creder (2022), o funcionamento eficiente do SPDA depende diretamente da correta interação entre seus componentes, não sendo suficiente a presença isolada de dispositivos de proteção. Essa perspectiva reforça a ideia de que o sistema deve ser concebido como um conjunto coordenado, cuja eficácia está associada à qualidade do projeto e à adequação às condições específicas da instalação.

Entre os diversos componentes do SPDA, o sistema de aterramento destaca-se como um dos mais críticos, tanto em termos de desempenho quanto de custo. O aterramento é responsável por dissipar a corrente elétrica no solo, reduzindo potenciais perigosos e garantindo a segurança das pessoas e dos equipamentos. Silva (2022) destaca que um sistema de aterramento bem projetado é fundamental para o funcionamento adequado do SPDA, sendo necessário considerar fatores como resistividade do solo e configuração da malha. Complementarmente, Coutinho (2021) aponta que a inadequação desses parâmetros pode elevar significativamente o risco de acidentes, incluindo tensões de passo e toque perigosas, o que evidencia a importância de um dimensionamento técnico

rigoroso.

No entanto, há diferentes abordagens na literatura quanto à forma de projetar sistemas de aterramento eficientes e economicamente viáveis. Enquanto alguns autores enfatizam a necessidade de estruturas mais robustas para garantir maior segurança, outros defendem a otimização do projeto como estratégia para reduzir custos sem comprometer o desempenho. Gennari (2017) argumenta que a geometria e a configuração da malha de aterramento influenciam diretamente o custo final do sistema, sendo possível obter soluções eficientes com menor uso de materiais a partir de ajustes técnicos adequados. Essa divergência evidencia que a relação entre custo e segurança não é linear, dependendo das escolhas de projeto adotadas.

Nesse cenário, a utilização de técnicas de otimização tem ganhado destaque como ferramenta para conciliar eficiência técnica e viabilidade econômica. Machado (2020) demonstra que métodos computacionais, como algoritmos de otimização, permitem ajustar parâmetros do sistema de aterramento de forma mais precisa, reduzindo custos sem comprometer os níveis de segurança exigidos pelas normas.

Essa abordagem representa um avanço em relação aos métodos tradicionais de dimensionamento, que muitas vezes resultam em projetos superdimensionados ou economicamente inviáveis.

Outro ponto relevante refere-se ao aproveitamento de componentes naturais das estruturas como parte do sistema de proteção. Netto (2016) destaca que elementos como armaduras metálicas podem ser utilizados como condutores naturais, desde que atendam aos requisitos normativos de continuidade elétrica e confiabilidade. Essa prática permite reduzir a quantidade de materiais adicionais, contribuindo para a diminuição dos custos do sistema. No entanto, sua aplicação exige critérios técnicos rigorosos, o que limita sua utilização em determinadas condições construtivas.

Além da proteção externa, a literatura também enfatiza a importância da proteção interna por meio de dispositivos como os DPS. Esses dispositivos atuam na limitação de sobretensões transitórias, protegendo equipamentos eletrônicos contra danos causados por descargas indiretas. Mamede e Ribeiro (2020) destacam que a ausência de proteção interna pode resultar em prejuízos significativos, especialmente em ambientes com alta concentração de equipamentos sensíveis. Por outro lado, Mamede (2023) ressalta que a eficácia dessa proteção depende da coordenação com os demais subsistemas do SPDA, evidenciando a necessidade de integração entre as diferentes formas de proteção.

Apesar dos avanços nas técnicas de projeto e nas normas técnicas, algumas limitações ainda podem ser observadas nas abordagens existentes. A dependência de dados teóricos e a dificuldade de aplicação prática em diferentes condições de solo e edificações podem comprometer a precisão dos projetos. Além disso, a diversidade de metodologias utilizadas nos estudos pode dificultar a padronização das soluções adotadas, o que evidencia a necessidade de maior integração entre teoria e prática no desenvolvimento de sistemas de proteção mais eficientes.

O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica estruturada, com base em normas técnicas, livros e trabalhos acadêmicos recentes, com o objetivo de compreender a relação entre segurança e economia de custos

em Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Inicialmente, foi realizada a contextualização do fenômeno das descargas atmosféricas e seus impactos nas edificações, seguida pela análise dos componentes do SPDA, incluindo sistemas de captação, descida, aterramento e proteção interna. Posteriormente, foram investigados os fatores que influenciam os custos de implementação e manutenção desses sistemas, bem como estratégias de otimização técnica que permitem a redução de custos sem comprometer a segurança das instalações.

Os resultados obtidos indicam que a eficiência do SPDA está diretamente relacionada ao correto dimensionamento de seus componentes, especialmente da malha de aterramento, considerada elemento fundamental para a dissipação segura das correntes elétricas. Conforme observado, variações nos parâmetros de projeto, como espaçamento entre condutores, profundidade das hastes e resistividade do solo, impactam diretamente tanto o desempenho quanto o custo do sistema. Coutinho (2021) demonstra que ajustes geométricos na malha podem reduzir significativamente o risco de falhas sem aumento proporcional de custos, evidenciando a importância da análise técnica detalhada no processo de projeto.

Nesse contexto, verificou-se que a utilização de elementos estruturais existentes nas edificações, como armaduras metálicas, pode contribuir para a redução de custos, desde que respeitados os critérios estabelecidos pelas normas técnicas. A adoção dessa prática reduz a necessidade de materiais adicionais e simplifica a execução do sistema. Netto (2016) destaca que o uso de componentes naturais da estrutura, quando devidamente integrado ao SPDA, apresenta desempenho satisfatório e viabilidade econômica, desde que haja continuidade elétrica e conformidade com os requisitos normativos.

Outro resultado relevante refere-se à importância da proteção interna das instalações, especialmente por meio da utilização de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na mitigação de sobretensões transitórias, que podem ser originadas tanto por descargas atmosféricas indiretas quanto por manobras operacionais na rede elétrica, como chaveamentos, energização de linhas e falhas no sistema de distribuição. Tais sobretensões, embora muitas vezes imperceptíveis do ponto de vista visual, são capazes de causar danos significativos a equipamentos eletroeletrônicos, comprometendo seu funcionamento, reduzindo sua vida útil ou até mesmo provocando sua queima imediata.

Nesse contexto, os DPS atuam como elementos de proteção que limitam a amplitude dessas sobretensões, desviando a corrente excedente para o sistema de aterramento e impedindo que ela atinja os equipamentos conectados à instalação. Essa atuação rápida e eficiente é essencial, especialmente em ambientes onde há grande concentração de dispositivos sensíveis, como sistemas de automação, computadores, equipamentos hospitalares, industriais e telecomunicações. A crescente digitalização das edificações e a dependência de sistemas eletrônicos tornam a proteção interna ainda mais indispensável no cenário atual.

Além disso, é importante destacar que a eficiência dos DPS está diretamente relacionada à sua correta especificação, instalação e coordenação com os demais elementos do sistema elétrico. A escolha inadequada do tipo de DPS, sua instalação em locais impróprios ou a ausência de coordenação entre dispositivos

em diferentes níveis de proteção podem comprometer significativamente sua eficácia. Dessa forma, torna-se imprescindível que o projeto da proteção interna seja realizado com base em critérios técnicos bem definidos, considerando fatores como nível de tensão da instalação, categoria de sobretensão, características da carga e exposição ao risco.

Sob a perspectiva econômica, a implementação de DPS representa um investimento relativamente baixo quando comparado aos prejuízos potenciais decorrentes da ausência de proteção. Danos a equipamentos eletrônicos, interrupções em processos produtivos, perda de dados e custos de manutenção corretiva são apenas alguns dos impactos que podem ser evitados com a adoção adequada desses dispositivos. Mamede e Ribeiro (2020) evidenciam que a ausência de proteção interna pode resultar em prejuízos superiores ao custo de implementação dos dispositivos, reforçando sua relevância no contexto do SPDA. Dessa forma, a proteção interna não deve ser encarada como um elemento opcional, mas sim como parte integrante e essencial de um sistema de proteção eficiente.

A análise comparativa dos elementos do sistema permite observar que a eficiência global do SPDA depende da integração entre seus subsistemas. A atuação isolada de componentes, como o aterramento ou os DPS, não garante proteção completa, sendo necessária a coordenação entre captação, condução e dissipação da energia. Nesse sentido, o SPDA deve ser compreendido como um sistema único e interdependente, no qual cada componente exerce uma função específica, mas complementar, contribuindo para o desempenho global da proteção.

A ausência de integração entre os subsistemas pode resultar em falhas significativas na proteção, mesmo quando os componentes individuais apresentam bom desempenho. Por exemplo, um sistema de aterramento eficiente pode não ser suficiente para proteger equipamentos internos caso não haja dispositivos de proteção contra surtos devidamente instalados. Da mesma forma, a presença de DPS sem um sistema de aterramento adequado compromete sua capacidade de desviar as correntes de surto de forma segura. Essa interdependência evidencia a necessidade de um projeto sistêmico, no qual todos os elementos sejam dimensionados e instalados de forma coordenada.

Adicionalmente, a integração entre proteção externa e interna contribui para a redução de tensões perigosas dentro da edificação, como tensões de passo e toque, além de minimizar os efeitos eletromagnéticos associados às descargas atmosféricas. A equipotencialização das massas metálicas e a correta interligação dos sistemas de aterramento são práticas fundamentais nesse processo, garantindo que as diferenças de potencial sejam reduzidas a níveis seguros durante a ocorrência de surtos.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), o desempenho do sistema está condicionado à compatibilidade entre os níveis de proteção adotados e o grau de risco da edificação, o que reforça a necessidade de um projeto integrado e normatizado. A NBR 5419 estabelece diretrizes claras para a análise de risco, definição das medidas de proteção e seleção dos componentes do SPDA, considerando fatores como tipo de construção, ocupação, localização e consequências de falhas. Dessa forma, o atendimento às normas técnicas não apenas garante conformidade legal, mas também assegura que o sistema seja dimensionado de maneira adequada às necessidades específicas da instalação.

Portanto, verifica-se que a integração entre os subsistemas do SPDA, aliada à correta aplicação de dispositivos de proteção interna como os DPS, constitui um fator determinante para a eficiência, segurança e viabilidade econômica do sistema. A adoção de uma abordagem integrada permite não apenas a mitigação dos riscos associados às descargas atmosféricas, mas também a otimização dos recursos empregados, consolidando a ideia de que segurança e economia podem ser alcançadas de forma conjunta por meio de um projeto técnico bem estruturado.

O quadro 1 apresenta uma síntese dos principais fatores que influenciam o custo e a eficiência do SPDA, com base nos estudos analisados.

Quadro 1. Fatores que influenciam o custo e a eficiência do SPDA

Fator analisado	Impacto no custo	Impacto na segurança
Dimensionamento da malha	Reduz custos quando otimizado	Aumenta a eficiência do sistema
Uso de estrutura existente	Diminui uso de materiais	Mantém desempenho adequado
Instalação de DPS	Aumenta custo inicial	Reduz danos e falhas
Tipo de solo	Pode elevar custo	Influencia diretamente o desempenho
Integração dos sistemas	Otimiza investimento	Garante proteção completa

Fonte: Gennari (2017).

Os resultados também indicam que a aplicação de técnicas de otimização no projeto das malhas de aterramento pode proporcionar redução significativa no uso de materiais e, conseqüentemente, nos custos totais. Machado (2020) demonstra que modelos computacionais, como algoritmos de otimização, são capazes de ajustar parâmetros geométricos de forma eficiente, mantendo os níveis de segurança exigidos pelas normas.

O quadro 2 apresenta uma comparação entre estratégias de projeto convencional e otimizado, evidenciando seus impactos.

Quadro 2: Comparação entre projeto convencional e otimizado de SPDA

Critério	Projeto convencional	Projeto otimizado
Uso de materiais	Elevado	Reduzido
Custo inicial	Alto	Moderado
Eficiência	Elevada	Elevada
Necessidade de manutenção	Frequente	Reduzida
Conformidade normativa	Atendida	Atendida

Fonte: Machado (2020).

A discussão dos resultados evidencia que a economia de custos em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas não está associada à eliminação de componentes essenciais, mas sim à otimização do projeto e à correta aplicação dos recursos disponíveis. Essa constatação é fundamental, uma vez que, em muitos casos, a tentativa de reduzir custos por meio da supressão de elementos do sistema pode comprometer diretamente a segurança das instalações, aumentando significativamente os riscos de falhas, danos estruturais e prejuízos financeiros. Assim, torna-se evidente que a economia sustentável, no contexto dos sistemas SPDA, deve ser baseada em decisões técnicas fundamentadas, e não em cortes arbitrários de investimento.

Os dados analisados demonstram que estratégias como o uso de elementos estruturais existentes, a integração entre subsistemas e a aplicação de técnicas de otimização contribuem de forma significativa para a redução de custos sem comprometer a segurança. O aproveitamento de componentes naturais da edificação, como armaduras metálicas, quando realizado de acordo com os critérios normativos, reduz a necessidade de materiais adicionais e simplifica o processo de instalação. Essa prática, além de economicamente vantajosa, promove maior integração entre a estrutura e o sistema de proteção, contribuindo para um desempenho mais uniforme e eficiente.

Da mesma forma, a integração entre os diferentes subsistemas do SPDA, incluindo captação, descidas, aterramento e proteção interna, permite uma distribuição mais equilibrada das funções de proteção, evitando redundâncias desnecessárias e otimizando o uso de recursos. Um sistema integrado possibilita que cada componente atue de maneira coordenada, reduzindo a necessidade de superdimensionamento individual e, conseqüentemente, os custos totais do projeto. Outro ponto de destaque refere-se à aplicação de técnicas de otimização no dimensionamento dos sistemas, especialmente no que diz respeito às malhas de aterramento. Métodos computacionais e modelos matemáticos permitem ajustar parâmetros como geometria, espaçamento entre condutores e profundidade das hastes, de modo a alcançar níveis adequados de desempenho com menor utilização de materiais. Essa otimização técnica contribui não apenas para a redução de custos iniciais, mas também para a diminuição de custos operacionais e de manutenção ao longo da vida útil do sistema.

Além disso, a análise dos resultados evidencia que a economia obtida por meio da otimização do projeto está diretamente relacionada à redução de desperdícios e à eliminação de soluções superdimensionadas. Em muitos casos, projetos convencionais adotam margens de segurança excessivas por falta de análise detalhada, o que resulta em sistemas mais caros do que o necessário. A adoção de critérios técnicos mais precisos e fundamentados permite alcançar o equilíbrio ideal entre segurança e custo, evitando tanto o subdimensionamento quanto o superdimensionamento.

Outro aspecto relevante diz respeito ao impacto da qualidade do projeto na durabilidade e confiabilidade do sistema. Sistemas bem dimensionados tendem a apresentar menor incidência de falhas, maior vida útil e menor necessidade de intervenções corretivas, o que contribui para a redução de custos ao longo do tempo. Dessa forma, a economia não se limita ao investimento inicial, mas se estende ao ciclo de vida completo da instalação, evidenciando a importância de uma abordagem de longo prazo no planejamento do SPDA.

Além disso, ao comparar os resultados obtidos com estudos recentes, observa-se convergência quanto à importância do dimensionamento adequado e da análise de risco na definição do sistema de proteção. A análise de risco, conforme estabelecida pelas normas técnicas, permite identificar o nível de proteção necessário para cada tipo de edificação, considerando fatores como localização, ocupação, características construtivas e consequências de falhas. Essa abordagem possibilita a adoção de soluções proporcionais ao risco, evitando tanto investimentos excessivos quanto proteções insuficientes.

3 CONCLUSÃO

A presente pesquisa abordou a relação entre segurança e economia de custos em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, com foco na análise de estratégias que permitam a implementação eficiente do SPDA sem comprometer a integridade das instalações e dos usuários. Ao longo do trabalho, buscou-se compreender os principais elementos que compõem esses sistemas, bem como os fatores técnicos e econômicos que influenciam diretamente seu desempenho e viabilidade.

Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar que a economia de custos em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas não está associada à redução de componentes ou à simplificação inadequada do sistema, mas sim à otimização do projeto como um todo. A utilização de técnicas de dimensionamento adequadas, a análise das características do solo, a integração entre os subsistemas de proteção e o aproveitamento de elementos estruturais existentes mostraram-se estratégias eficazes para reduzir custos sem comprometer a segurança. Dessa forma, evidencia-se que a eficiência técnica é o principal fator responsável pela viabilidade econômica do sistema.

O objetivo geral da pesquisa foi plenamente alcançado, uma vez que se conseguiu compreender de forma clara o impacto da economia de custos em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, demonstrando que é possível equilibrar segurança e investimento por meio de um projeto bem elaborado. Os objetivos específicos também foram atendidos, pois foram analisados os custos relacionados às malhas de aterramento, compreendido o papel dos dispositivos de proteção interna e avaliada a influência do dimensionamento adequado no desempenho e no custo final do sistema.

Os resultados obtidos evidenciaram que o aterramento é um dos elementos mais críticos do SPDA, sendo responsável não apenas pela dissipação da corrente elétrica, mas também por grande parte do custo do sistema. Além disso, verificou-se que a proteção interna, por meio de dispositivos como os DPS, desempenha papel fundamental na preservação dos equipamentos elétricos, evitando prejuízos que podem superar significativamente o investimento inicial. A integração entre os sistemas externo e interno foi outro ponto relevante, demonstrando que a atuação conjunta dos componentes é essencial para garantir a eficiência global da proteção.

A hipótese inicial do estudo, que considerava a possibilidade de redução de custos sem prejuízo à segurança, foi confirmada ao longo da pesquisa. Observou-se que pequenas alterações no projeto, quando baseadas em critérios técnicos, podem gerar economia significativa, sem comprometer o desempenho do

sistema. No entanto, também se constatou que essa economia depende diretamente da qualificação técnica do projeto, não sendo possível alcançá-la por meio de soluções simplificadas ou pela retirada de elementos essenciais.

Apesar dos resultados positivos, a pesquisa apresentou algumas limitações, principalmente por se tratar de uma revisão bibliográfica, o que restringe a análise a dados teóricos e estudos já existentes. A ausência de aplicação prática ou estudo de caso limita a verificação empírica dos resultados, o que poderia enriquecer ainda mais as conclusões obtidas. Além disso, a diversidade de metodologias e abordagens nos estudos analisados pode dificultar a padronização das comparações realizadas.

Diante disso, sugere-se que pesquisas futuras avancem na aplicação prática dos conceitos abordados, por meio de estudos de caso, simulações computacionais ou análises experimentais, permitindo validar de forma mais concreta os benefícios das estratégias de otimização propostas. A ampliação do estudo para diferentes tipos de edificações e condições ambientais também pode contribuir para uma compreensão mais abrangente do tema.

Por fim, conclui-se que a segurança e a economia em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas não são objetivos conflitantes, mas sim complementares quando abordados de forma técnica e planejada. Um projeto bem dimensionado, alinhado às normas e às características da edificação, é capaz de garantir proteção eficiente e viabilidade econômica, contribuindo para a preservação de vidas, patrimônios e sistemas elétricos, além de promover maior confiabilidade e sustentabilidade nas instalações.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5419: proteção contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Disponível em: <https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-05419-01-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Estruturas-Contra-Descargas-Atmosf%C3%A9ricas.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2026.

COUTINHO, Braulio Roberto de Melo. **Avaliação de malhas de aterramento de subestações: uma abordagem probabilística do risco de fatalidades**. 2021. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/5e41fcc2-c988-4bef-a510-f1090b458f15/content>. Acesso em: 25 mar. 2026.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 17. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GENNARI, Rodrigo. **Malha de aterramento de subestações**. 2017. 62 f. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/525da588-8a06-40de-92fd-0e78299555f9/content>. Acesso em: 25 mar. 2026.

MACHADO, Leandro Soares. **Modelo de otimização GA-Fuzzy para malhas de aterramento de subestações**. Revista Eletrônica de Tecnologia e Engenharia, 2020. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15202/209209213704>. Acesso em: 25 mar. 2026.

MAMEDE, João Filho. **Instalações elétricas industriais**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

MAMEDE, João Filho; RIBEIRO, Daniel Mamede. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

NETTO, José Ribamar Barros. **Aplicação da proteção contra descargas atmosféricas utilizando componentes naturais da estrutura de acordo com a NBR 5419:2015**. 2016. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016. Disponível em: <https://>

repositorio.uema.br/handle/123456789/5001. Acesso em: 25 mar. 2026.

NISKIER, Júlio; MACINTYRE, A. J. **Instalações elétricas**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

SILVA, Arthur Lira da. **A importância do aterramento: sistema de proteção de descargas atmosféricas**. 2022. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Cuiabá (UNIC), Cuiabá, 2022. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/64382/1/ARTHUR%20LIRA%20DA%20SILVA.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2026.



Capítulo 11

INFILTRAÇÃO EM LAJES DE COBERTURA: BREVE COMENTÁRIO SOBRE ANOMALIAS E PREVENÇÃO

WATER INFILTRATION IN ROOF SLABS: A BRIEF COMMENTARY ON ANOMALIES AND
PREVENTION

José Francisco Gomes da Silva¹

Mirian Nunes de Carvalho Nunes²

José Átila Matos Aroucha Júnior³

¹ Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

³ Docente, Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

É fundamental que as edificações apresentem condições apropriadas para sua destinação. Para que essa premissa se cumpra, é necessário, uma atenção mais responsável para as edificações, que em pouco tempo de uso já apresentam algumas anomalias patológicas pelo não emprego de técnicas construtivas adequadas, dentre elas destaca-se algumas patologias que acomete as lajes de cobertura. Diante disso, este trabalho teve como foco verificar: quais fatores contribuem para o surgimento de infiltrações em lajes de cobertura e quais medidas preventivas e corretivas podem ser adotadas para reduzir seus efeitos? Para tanto, definiu-se investigar as principais causas das infiltrações em lajes de cobertura, e assim, citar seus impactos estruturais e funcionais, e verificar as medidas de prevenção e correção que contribuam para a durabilidade das edificações. Para a elaboração deste trabalho foi realizada uma pesquisa qualitativa e descritiva de revisão bibliográfica, com a finalidade de aprimorar e atualizar o conhecimento, através de uma investigação científica de obras já publicadas. Os principais critérios de inclusão definidos para os materiais do levantamento bibliográfico para este trabalho foram no idioma português e publicações compreendidas nos últimos 10 anos. Após esse percurso verificou-se que é fundamental que haja uma equipe especializada e treinada que execute obedecendo às normas técnicas a impermeabilização em edificações com a finalidade previa de evitar danos e gastos futuros.

Palavras-chave: Infiltração. Laje. Impermeabilização.

Abstract

It is fundamental that buildings present It is fundamental that buildings present. For this premise to be fulfilled, more responsible attention to buildings is necessary, as they often exhibit pathological anomalies after a short period of use due to the lack of appropriate construction techniques. Among these, some pathologies affecting roof slabs stand out. Therefore, this work focused on verifying: what factors contribute to the emergence of infiltrations in roof slabs and what preventive and corrective measures can be adopted to reduce their effects? To this end, it was defined to investigate the main causes of infiltrations in roof slabs, and thus, to cite their structural and functional impacts, and to verify the preventive and corrective measures that contribute to the durability of the buildings. For the elaboration of this work, a qualitative and descriptive bibliographic review was carried out, with the purpose of improving and updating knowledge through a scientific investigation of already published works. The main inclusion criteria defined for the bibliographic survey materials for this work were publications in Portuguese from the last 10 years. Following this process, it was found that it is fundamental to have a specialized and trained team that performs waterproofing in buildings in accordance with technical standards, with the prior purpose of preventing future damage and expenses.

Keywords: Water infiltration. Slab. Waterproofing.

1 INTRODUÇÃO

As construções necessitam de intervenções de conservação e da realização de inspeções periódicas para avaliar suas condições gerais, bem como em seus sistemas construtivos para descobrir possíveis falhas e manifestações (Silva, 2020). Consideradas como estruturas físicas, as edificações, tem como finalidade realizar atividades produtivas, tanto de forma direta, quanto indireta (ABNT NBR 5674, 2024).

É fundamental que as edificações apresentem condições apropriadas para sua destinação. Não obstante, para que essa premissa se cumpra, é necessário, uma atenção mais responsável para as edificações, que em pouco tempo de uso tendem a apresentar algumas anomalias patológicas.

A escolha do tema se deu pela relevância que as lajes de cobertura merecem ter em relação as patologias que se apresentam devido a diversos fatores que podem causar desde deterioração de materiais até danos à saúde dos ocupantes, não se pode deixar de mencionar os custos elevados que podem ocorrer para realizar reparos e manutenção quando não diagnosticados precocemente. Dessa forma, estudar para prevenir possíveis soluções das patologias, contribui para vida útil das construções.

A relevância desse estudo oferece contribuições acerca da prevenção das patologias em lajes de cobertura por meio de revisão bibliográfica a fim de contribuir na escolha de formas de prevenção deste problema. Outrossim a pesquisa apresenta informações que contribuem para o conhecimento das possíveis falhas que causam as patologias, e dessa forma podem ser evitadas. Desse modo, o presente projeto identificou as causas das patologias recorrentes em lajes de cobertura e apresenta por meio de pesquisa bibliográfica possíveis soluções já aplicadas nesses casos em estudos anteriores.

Diante disso, questionou-se: quais fatores contribuem para o surgimento de infiltrações em lajes de cobertura e quais medidas preventivas e corretivas podem ser adotadas para reduzir seus efeitos? Para responder ao questionamento foi necessário investigar as principais causas das infiltrações em lajes de cobertura, analisando seus impactos estruturais e funcionais, e verificando as medidas de prevenção e correção que podem contribuir para a durabilidade das edificações, para assim, citar possíveis técnicas de impermeabilização disponíveis no mercado e sua eficiência.

Este estudo foi relevante pois oferece contribuições para a sociedade e comunidade acadêmica, de forma a esclarecer conhecimento que se traduz em construções mais estáveis e resistentes, capazes de atender melhor às necessidades coletivas e assim, contribuir para a melhoria da qualidade de vida uma vez que, houve melhor entendimento sobre o estudo da infiltração em lajes de cobertura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Para a elaboração deste trabalho foi realizada pesquisa qualitativa e descritiva de revisão bibliográfica, com a finalidade de aprimorar e atualizar o conhe-

cimento, através de investigação científica de obras já publicadas. Os principais critérios de inclusão definidos para os materiais do levantamento bibliográfico para este trabalho foram no idioma português e publicações compreendidas nos últimos 10 anos para artigos, monografias, dissertações e teses. As buscas foram feitas em sites acadêmicos como *Scientific Electronic Library Online – SciELO*, Google acadêmico, Biblioteca digital USP, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações e Periódicos CAPES para relatar e expor sobre o tema proposto.

2.2 Resultados e Discussão

De acordo com a Normas Brasileiras de Regulamentação – NBR 9575 (2010) a importância da impermeabilização está em conter a passagem de fluidos que possam eventualmente evaporar das edificações em locais que requer estanqueidade, estando estes integrados ou não a outro sistema construtivo; proteger os elementos construtivos contra as intempéries, e, possibilitar a impermeabilização antes que haja degradação das estruturas e elementos construtivos.

Nas palavras de Butzke (2020), a água acarreta inúmeros danos indesejáveis nas construções. As edificações apresentam-se expostas às intempéries, e com o passar do tempo, estão propensas a se deteriorar. Outro agravante é que a água contribui com agentes agressivos que aceleram a deterioração.

Ao mencionar os danos que a água pode causar, Dias *et al.* (2022), menciona que a infiltração que ocorre nas edificações por águas da chuva através da cobertura, é um caso recorrente, que gera desvalorização, depreciação e desconforto aos usuários, minimizando o tempo do imóvel. O autor ainda explana que em lajes de cobertura se não houver um projeto adequado, os custos com manutenção e os transtornos causados para reparar os danos são maiores que os custos com a prevenção.

Os principais mecanismos identificados com frequência em relação à presença da umidade que causam danos nas lajes de coberturas são apresentados por patologias que são manifestações observadas no teto dos ambientes internos, tais como manchas de umidade, surgimento de bolor e mofo, eflorescência, empoamento e descascamento de pinturas, além de gotejamento em períodos chuvosos, evidenciando a perda de estanqueidade da laje. Juntamente com essas possíveis causas de deterioração das lajes nas edificações, desconfortos podem aparecer com a umidade e causar problemas para os usuários.

Ao se referir a umidade em lajes, essa propicia à deterioração de tetos, migrando para os cantos de paredes (ver Fig. 1), favorece a corrosão de armaduras de concreto e a degradação de revestimentos, faz com que a integridade dos materiais seja comprometida, reduz a durabilidade da edificação e aumenta os custos de manutenção e reparo (Bessler, 2024).

Reportando-se a essa questão, é importante mencionar o que afirma Ongaratto (2024) ao identificar a umidade entre os fatores que influenciam na estrutura e contribuem para a diminuição da durabilidade da edificação e provocam a redução de sua vida útil. Este fator apresenta diferentes origens e é responsável por processos degradativos que afetam a segurança e a habitabilidade das edificações.

Outra manifestação patológica muito recorrente nas edificações é o bolor e

o mofo, especialmente presentes em locais cuja umidade e ventilação são insuficientes, possibilitando a proliferação desses microrganismos. A umidade quando instalada em tetos e cantos de paredes, torna-se propícia para o desenvolvimento e à presença de materiais orgânicos. Fatores como este comprometem a estética da edificação e causam odores desagradáveis e característicos que inevitavelmente acarretam problemas a saúde dos usuários levando-se em consideração a relação existente entre os processos alérgicos e respiratórios (Sousa Neto, 2026).

Nas pesquisas de Santiago e Silva (2022) onde foi analisado um estudo de caso em um prédio público na cidade de Quixeré no Ceará, foi detectada a ausência de manutenção no telhado e impermeabilização de laje e paredes, facilitando assim o escoamento da água nos períodos chuvosos, situação que favorece a proliferação de fungos responsáveis pelo aparecimento de mofo, manchas de bolor, e comprometendo o concreto e argamassa conforme mostra a Fig. 2. De acordo com as autoras, tais patologias podem ser evitadas com a aplicação de impermeabilizantes que pode ser realizado durante a construção, e manter a manutenção periódica da edificação.



Figura 1. Mancha resultante infiltração laje
Fonte: Santiago; Silva (2022).



Figura 2. Parede como mofo, bolor e eflorescência
Fonte: Santiago; Silva (2022).

No que se refere a minimizar a aparência inadequada e de odores em locais com mofos e bolores, Rosa, Araújo e Oliveira (2018) orientam que algumas soluções, são possíveis de realizar e atuam como medidas corretivas ou que os eliminam o problema, dentre elas executar a limpeza do local com lavagem e secagem e utilizar produtos removedores de mofo e odores; aplicar soluções desinfetantes; e repintar com material adequado. Entretanto, é recomendado que o local tenha boa ventilação, para assim, evitar a proliferação das fontes, utilizar tintas fungicidas, evitar pinturas em paredes úmidas e materiais higroscópico, essas são ações preventivas. É importante identificar as infiltrações ou vazamentos e solucioná-los realizando uma inspeção no local e próximo a ele.

Cita-se ainda uma patologia que compromete a edificação, trata-se da eflorescência, que ocorre por meio da capilaridade, representada por um fenômeno onde há uma deposição de sais cristalinos esbranquiçados que surgem nas superfícies, após a evaporação da água, e que devido a reações químicas que ocorrem entre variados componentes, propaga-se de formam generalizada ou em pontos isolados (Fernandes, 2019).

Nas palavras de Schuster (2022), essa patologia ocorre pela presença de três fatores que contribuem para seu surgimento: sais solúveis, a ação da água e pressão hidrostática, elementos essenciais para que a mistura ocasionada entre elas evapore e atinja a superfície. Para Gisoato; Yuba; Latosinski, (2024), embora aparentemente inofensiva e com possibilidades de remoção, não descartam que a patologia de capilaridade oferece danos que comprometem a aparência estética dos revestimentos. Quanto mais tempo os sais permanecerem nos poros dos materiais, maiores serão os danos causados a laje e a estrutura, sendo, portanto, considerados agressivos.

No que se refere a patologia de empolamento e descascamento de pinturas, estas também estão sujeitas à umidade e infiltrações, como resultado apresentam bolhas de água que são decorrentes da infiltração por fissuras ocasionadas por problemas na execução das lajes. As bolhas surgem em virtude de pequenos pontos onde não houve adesão do filme ao substrato. Possivelmente está relacionado à aplicação da pintura em superfície úmida em virtude da infiltração de água. É necessário eliminar a raiz do problema, prosseguindo com eliminação nos pontos afetados de resíduos por meio de raspagem e aplicação de nova cobertura do filme de preferência com um material adequado.

Silva; Roque (2023) mencionam que a chuva também é um grande fator que contribui para infiltração de água nas lajes. Alguns fatores são determinantes para que a ação da chuva interfira nas edificações como direção, velocidade do vento, intensidade e precipitação, umidade do ar. Considera ainda os fatores construtivos referentes a impermeabilização, porosidade dos elementos de revestimento, sistema de esgotamento de água, dentre outros.

Assim, a percolação, acontece pela entrada de água líquida podendo esta, ser da chuva, lençol freático ou vazamentos, e tende a se acumular ou atravessar a edificação por meio de fissuras, falhas na impermeabilização, vedação mal realizados em juntas ou por pressão hidrostática (ver fig.3). E em decorrência dessas infiltrações, há o surgimento de formação de bolor, corrosão, comprometimento com qualidade do ar interno, com o sistema estrutural e umidade, principalmente em edificações antigas ou mal projetadas, conforme estudos realizados por Lopez-Carreón (2025).



Figura 3. Tipos de atuação dos fluidos

Fonte: Santiago; Silva (2022)

Um dos meios para detectar a origem da infiltração é a utilização de equipamentos como câmera termográfica e utilizar mão-de-obra especializada; em se tratando de laje é necessário atingir a camada da impermeabilização antiga, realizando os reparos necessários onde houver trincas e fissuras e refazer as camadas de impermeabilização (Dias *et al.*, 2022).

Uma das medidas preventivas e corretivas que consistem em evitar infiltrações em lajes de cobertura previstas em Normas Brasileiras de Regulamentação – NBR é o teste de estanqueidade, considerado obrigatório e que consiste em realizar monitoramento da laje por no mínimo 72 horas após a mesma ser preenchida com água (NBR 9574; NBR 9575).

A investigação com traçadores é uma técnica utilizada para detectar possíveis fissuras e rachaduras existentes na laje. Por meio dos traçadores, uso de corantes químicos, pode ser detectado o caminho, o tempo de movimentação de materiais encontrados na água. Os traçadores são divididos em ambientais ou artificiais (Ferreira, 2025)

Ao mencionar acerca da degradação é importante frisar que é um processo natural de qualquer estrutura, entretanto se houver manutenção da edificação com certeza haverá um aumento da vida útil. Portanto, acompanhar a edificação durante a construção e realizar manutenções é essencial para o diagnóstico precoce das manifestações patológicas advindas possivelmente de etapas mal elaboradas da construção (Fernandes, 2019).

Comentar sobre o desempenho das edificações refere-se às condições de uso de seus sistemas e ao comportamento de uma edificação, no que se refere a atingir diferentes níveis, desde a exposição ao meio até a ação dos usuários. Quando se trata do desempenho das edificações, faz-se necessário a certeza da eficácia da mesma e o cumprimento de condições mínimas de funcionalidade, lazer, praticidade, a fim de proporcionar melhor qualidade de vida para os usuários do imóvel (Fernandes 2019).

No estudo de Ribeiro (2020) são apresentados tipos de sistemas impermeabilizantes que tem sua realização indicada tanto para o período da obra quanto posterior a ela, sendo que de impermeabilização tem diferentes concepções, bem como técnicas de utilidade, funcionamento, materiais, dentre outros. Para melhor compreensão dessa classificação é necessário verificar e compreender os diversos tipos existentes no mercado. Os sistemas de impermeabilização são divididos em rígidos e flexíveis, sua ligação se dá com as partes estruturais nas quais podem ocorrer fissuras ou não.

Quanto à aderência que possuem ao substrato, podem ser aderidos: o produto impermeabilizante tem fixação total ao substrato por meio de derretimento do material por adesivos colantes ou maçarico, semi-aderido: sua ocorrência se dá em áreas específicas como platibandas e ralos e, flutuante: indicada para área com maiores deformidades, quando há um desligamento entre a impermeabilização e a superfície (Ribeiro, 2020).

Em um estudo de caso realizado por Cruz; Paula (2020), os autores utilizaram como teste uma lamina d'água de 10mm para testar a estanqueidade em 14 lajes de concreto armado medindo 0,40x0,40,0,05, a armadura proposta utilizou CA 60 com bitola de Ø 4,2mm, sendo que foram utilizados diferentes tipos de impermeabilizantes e aplicados com quantidades variadas de camadas. O tempo de teste foi de 72 horas com a lâmina d'água e após a retirada, foi verificado

o resultado depois de 24 horas afim de observar as possíveis patologias que puderam surgir. O tempo de cura foi de 15 dias e após esse período as lajes foram novamente submetidas ao teste de estanqueidade recebendo 10mm de lamina de agua por 72 horas. O resultado obtido é apresentado a seguir na fig. 4.

	1 demão	2 demãos	3 demãos	4 demãos
Membrana acrílica	Redução de 1mm do nível d'água e manchas em cerca de 80% da área impermeabilizada	Nenhum dano ou alteração	Nenhum dano ou alteração	Nenhum dano ou alteração
Membrana asfáltica	Redução de 1mm do nível d'água e surgimento de bolhas	Redução de 1mm do nível d'água e surgimento de bolhas	Surgimento de bolhas	Surgimento de bolhas
Emulsão asfáltica	Redução de 2mm do nível d'água, coloração da água, manchas em cerca de 85% da área impermeabilizada e surgimento de bolhas	Redução de 2mm do nível d'água, coloração da água e surgimento de bolhas	Surgimento de bolhas e manchas em cerca de 90% da área impermeabilizada	Surgimento de bolhas e manchas em cerca de 35% da área impermeabilizada
Lajes não impermeabilizadas	Redução de todo o nível d'água			

Figura 4. Comparativo dos tipos de impermeabilizantes testados

Fonte: Cruz; Paula (2020)

Observa-se, portanto, que das 14 lajes testadas, as que obtiveram melhor resultado, não havendo infiltração, foram as que utilizaram membrana acrílica aplicando-se duas demãos do material, havendo um resultado satisfatório, não apresentando nenhum tipo de dano ou alteração. Vale lembrar que em relação aos outros produtos, mesmo aplicando-se a quantidade de demãos informada pelo fabricante, ainda assim houve infiltração, bem como para a laje que não recebeu nenhum produto (Cruz; Paula 2020).

Dessa forma, impermeabilizar lajes deve ser considerada uma prática realizada com seriedade e responsabilidade, ações que iniciam na concepção do projeto, no momento da execução, aplicando as normas técnicas referentes e mão-de-obra especializada sob fiscalização de profissional competente (Dias et al., 2022).

3 CONCLUSÃO

Observou-se com o trabalho o quão importante é a impermeabilização de edificações e em especial em lajes de cobertura. Com base na pesquisa bibliográfica e nos estudos realizados constatou-se que a degradação das edificações é um fator natural, porém com manutenção e prevenção a durabilidade da mesma podem ser mantidas.

A contribuição na prevenção da ocorrência de patologias inicia-se na execução do projeto e compreendem alguns métodos preventivos de impermea-

bilização que se apresentam divididos em rígidos e flexíveis, bem como testes específicos que demonstram o acúmulo de água em determinados pontos da laje, definido como estanqueidade.

Constatou-se ainda que as manifestações ocorrem sem data prevista, podendo acontecer a qualquer momento e podem evoluir gradativamente, por essa razão é de suma importância seguir as normas técnicas e executá-las com responsabilidade por meio de uma gestão de qualidade, o que requer profissionais técnicos responsáveis e equipe habilitado principalmente para esse fim específico que é a impermeabilização de lajes.

Diante do exposto, nota-se a relevância dos fatores já citados bem como conhecer e buscar novos métodos de impermeabilização para evitar qualquer manifestação que possa ocorrer por negligência no processo de execução. Por fim, a realização deste trabalho contribui para fomentar sobre o tema, uma vez que as experiências observadas em literaturas publicadas apresentem a preocupação com uma execução de qualidade. Assim, espera-se que este estudo contribua para o aprofundamento futuro de novas pesquisas e que venha a complementar este.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9574: **Execução de impermeabilização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 14 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9575: **Impermeabilização: Seleção e projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 14 p.

BESSLER, Arthur Spies. **Impacto técnico e econômico da perda de desempenho da edificação decorrente de infiltrações de água**. 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/279353>. Acesso em: 20 out. 2025.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P.R.L. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de textos, 230p. 2019. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=g-bEDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false Acesso em: 20 out. 2025.

BUTZKE, Vanessa Isabel. **Estudo comparativo entre argamassa impermeabilizante flexível e manta asfáltica para impermeabilização**. 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/218104>. Acesso em: 20 out. 2025.

DA CRUZ, Rafael Barreto Castelo; DE PAULA, Letícia Silva. AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES EM LAJES DE CONCRETO ARMADO. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 18, n. 1, p. 1-9, 2020. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1010>. Acesso em: 10 abr. 2026.

DIAS, Raquel Buttow Nunes et al. Impermeabilização na cobertura do Hospital de Ensino Odontológico da UFRGS: estudo de caso. In: **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções (5.: 2022: Gramado). Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre]: ALCONPAT, 2022**. 2022. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=IMPERMEABILIZA%C3%87%C3%83O+NA+COBERTURA+DO+HOSPITAL+DE+E&btnG=. Acesso em: 28 out. 2025.

DOS SANTOS FÉLEX, Danielle; DE LACERDA, Thamirys Raket Vieira; DE FRANÇA SILVA, Pedro Henrique. Manifestações patológicas relacionadas à impermeabilização em lajes de coberturas em edificações. **Revista Mangaio Acadêmico**, v. 6, n. 1, p. 64-82, 2021. Disponível em: <https://estacio.periodicoscientificos.com.br/index.php/mangaio/article/view/1548>.

Acesso em: 12 set. 2025.

FERNANDES, Magaly Alves; ESTANISLAU, Nájla Bitencourt Gonzaga Louzada e; MENDES, Tâmara Mariane Teixeira. **Técnicas de impermeabilização para assegurar a durabilidade das edifica-**

ções.2019. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, 2019.

FERREIRA, Bruna dos Santos Cezar; BACELLAR, Luis de Almeida Prado; DE LIMA, Hernani Mota. Comparação Entre Traçadores Químicos Fluorescentes e Seus Respetivos Resultados Obtidos Através da Metodologia de Injeção de Traçadores no Entorno de Cavidades Para Detecção de Influência Hídrica. Estudo de Caso em Serra Norte, Carajás/PA. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, p. 36-50, 2021.

GISOATO, Aline Ferreira; YUBA, Andrea Naguissa; LATOSINSKI, Karina Trevisan. **Eflorescências em solo álcali-ativado: metodologia para avaliação**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024. p. 1-9. DOI: 10.46421/entac.v20i1.6172. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6172/5013>. Acesso em: 20 nov. 2025.

LOPEZ-CARREON, I., JAHAN, E., YARI, M. H., ESMIZADEH, E., RIAHINEZHAD, M., LACASSE, M., XIAO, Z., & DRAGOMIRESCU, E. (2025). **Moisture Ingress in Building Envelope Materials: (II) Transport Mechanisms and Practical Mitigation Approaches**. *Buildings*, 15(5), 762. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings15050762>. Acesso em: 28 out. 2025.

ONGARATTO, Guilherme. **Análise de manifestações patológicas decorrentes da umidade em edificação multifamiliar**: estudo de caso. 2024. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmn-nnibpcajpcglclefindmkaj/https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/279330/001211718.pdf?sequence=1>. Acesso em: 28 out. 2025.

RIBEIRO, Andressa Clécia Ribeiro Gonçalves; AZEVEDO, Flávia Garrett; FERREIRA, Flávia Gonçalves Domingues; AZEVEDO FILHO, Rildo Duarte de. Impermeabilização a base de polímero acrílico: estudo de caso no tratamento de infiltração da laje de cobertura. **Revista Eletrônica da Estácio Recife, [S. l.]**, v. 5, n. 2, 2020. Disponível em: <https://reer.emnuvens.com.br/reer/article/view/317>. Acesso em: 28 out. 2025.

ROSA, C. de A. C., ARAÚJO, G. L. de, OLIVEIRA, J. D. de. **Análise das manifestações patológicas no condomínio recreio das Laranjeiras Serra- ES**. 2018. Disponível em: < <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/06/analise-dasmanifestacoes-patologicas-no-condominio-recreio-das-laranjeiras-serraes.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SILVA, Renzo Araujo; ROQUE, Alex Borges. **Patologias ocasionadas pela umidade nas edificações** [em linha]. nov. 2023. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmn-nnibpcajpcglclefindmkaj/https://pdfs.semanticscholar.org/19fb/641b4614db8c9cdf93fa4b73bce94b5458a8.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

SOUSA NETO, João Valmar de. Análise de manifestações patológicas por umidade em uma unidade hospitalar: estudo de caso na cidade de Icó-CE. p.53f. : il. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026.

SCHUSTER, Igor Dalmolin. Estudo sobre eflorescências ocasionadas em alvenaria estrutural cerâmica. 2022. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11624/3524>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SANTIAGO, Andreza Araujo; SILVA, Jusciane da Costa e. **Estudo e Patologias causadas por infiltrações em prédio público na cidade de Quixeré-CE**. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO - UFRSA CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA Trabalho de Conclusão de Curso (2022.2). Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/a0574d00-6536-4546-b38a-44676051e54e/content>. Acesso em: 4 maio. 2025.



Capítulo 12

A GESTÃO DA QUALIDADE COMO INSTRUMENTO DE MELHORIA DE PROCESSOS E INOVAÇÃO NAS ORGANIZAÇÕES

QUALITY MANAGEMENT AS A TOOL FOR PROCESS IMPROVEMENT AND INNOVATION IN ORGANIZATIONS

Leonardo Alves Mariano Junior¹

Ramaiany Carneiro Mesquita²

¹ Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia de Materiais, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A gestão da qualidade configura-se como um instrumento estratégico para a melhoria de processos e promoção da inovação nas organizações, especialmente em contextos marcados por elevada competitividade e constantes transformações tecnológicas. Este estudo teve como objetivo analisar de que forma a gestão da qualidade contribui para o aprimoramento dos processos organizacionais e para o estímulo à inovação nas empresas. A metodologia adotada baseou-se em uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e descritiva, fundamentada em produções científicas relacionadas à gestão da qualidade, melhoria contínua e inovação organizacional. Os resultados evidenciam que a aplicação estruturada da gestão da qualidade favorece a padronização dos processos, a redução de desperdícios, o aumento da produtividade e a melhoria contínua das atividades organizacionais. Além disso, observou-se que a integração entre qualidade e inovação fortalece a capacidade de adaptação das empresas frente às mudanças do mercado, contribuindo para maior eficiência operacional e sustentabilidade organizacional. Conclui-se que a gestão da qualidade desempenha papel fundamental no fortalecimento da competitividade empresarial, ao promover práticas mais eficientes, inovadoras e alinhadas às exigências do ambiente organizacional contemporâneo.

Palavras-chave: Eficiência operacional. Processos organizacionais. Inovação. Melhoria contínua. Competitividade.

Abstract

Quality management is considered a strategic tool for process improvement and the promotion of innovation within organizations, especially in contexts characterized by high competitiveness and constant technological transformations. This study aimed to analyze how quality management contributes to the enhancement of organizational processes and to the stimulation of innovation in companies. The adopted methodology was based on a qualitative and descriptive bibliographic review, grounded in scientific publications related to quality management, continuous improvement, and organizational innovation. The results suggest that the structured application of quality management favors process standardization, waste reduction, increased productivity, and the continuous improvement of organizational activities. Furthermore, the literature analyzed indicates that the integration between quality and innovation strengthens companies' ability to adapt to market changes, contributing to greater operational efficiency and organizational sustainability. It is concluded that quality management plays a fundamental role in strengthening business competitiveness by promoting more efficient, innovative practices aligned with the demands of the contemporary organizational environment.

Keywords: Operational efficiency. Organizational processes. Innovation. Continuous improvement. Competitiveness.

1 INTRODUÇÃO

A gestão da qualidade constitui-se como um dos principais instrumentos utilizados pelas organizações para alcançar melhores níveis de desempenho e competitividade. Em um cenário caracterizado por rápidas transformações tecnológicas, aumento da concorrência e crescente exigência dos consumidores, torna-se necessário desenvolver práticas capazes de assegurar maior eficiência nos processos e melhor qualidade nos produtos e serviços ofertados. Nesse contexto, a adoção de métodos de controle, avaliação e melhoria contínua representa um fator estratégico para a permanência das empresas no mercado (Gonçalves, 2020).

Além da busca por eficiência operacional, a gestão da qualidade está relacionada à capacidade das organizações de gerar resultados consistentes e sustentáveis. A aplicação de técnicas de padronização, monitoramento e análise de desempenho contribui para a redução de desperdícios, o aumento da produtividade e a elevação do nível de satisfação dos clientes. Dessa forma, a qualidade deixa de ser entendida apenas como um requisito técnico e passa a ser considerada um diferencial competitivo e uma ferramenta essencial de gestão organizacional (Queiroz, 2022).

A relevância do tema justifica-se pela necessidade de compreender de que maneira os processos organizacionais influenciam os resultados alcançados pelas empresas e como a inovação pode potencializar tais resultados. Apesar da ampla difusão de programas de qualidade, estudos indicam que diversas organizações ainda enfrentam dificuldades para integrar processos padronizados e práticas inovadoras em suas rotinas, especialmente em setores industriais e de serviços que demandam alta adaptabilidade (Nogueiro, 2019). Diante dessa realidade, formula-se o seguinte problema de pesquisa: de que forma a gestão da qualidade, por meio da melhoria dos processos e da incorporação da inovação, contribui para melhores resultados organizacionais?

A investigação desse problema é importante porque permite analisar a relação entre qualidade, desempenho e inovação em ambientes empresariais cada vez mais dinâmicos. Também possibilita identificar práticas capazes de promover maior eficiência, competitividade e capacidade de adaptação às mudanças do mercado. Nesse sentido, o estudo contribui para ampliar a compreensão acerca da importância de integrar ferramentas de gestão da qualidade com estratégias inovadoras, considerando as exigências atuais das organizações.

Diante disso, o objetivo geral deste artigo é analisar de que forma a gestão da qualidade contribui para a melhoria dos processos organizacionais e para o estímulo à inovação. Como objetivos específicos, definem-se: Descrever a importância da padronização e do controle de processos na gestão da qualidade; Identificar os principais resultados proporcionados pela gestão da qualidade; Examinar de que maneira a inovação atua como elemento de fortalecimento das práticas de qualidade nas organizações.

A presente pesquisa caracterizou-se como uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa e descritiva, desenvolvida com a finalidade de analisar a relação entre gestão da qualidade, melhoria dos processos, resultados organizacionais e inovação. A escolha desse método justificou-se pela possibilidade de reunir e interpretar conhecimentos já produzidos sobre o tema, sem a realização de coleta de dados em campo.

A busca bibliográfica foi realizada entre os meses de fevereiro e março de 2026, contemplando trabalhos publicados nos últimos dez anos, no período de 2016 a 2025, por se tratar de um recorte temporal capaz de apresentar estudos atualizados sobre a temática. Contudo, também foram utilizadas algumas obras clássicas anteriores a esse período, como forma de complementar a fundamentação teórica e conceitual do estudo, devido à relevância histórica e acadêmica de seus autores para a área da gestão da qualidade.

As buscas foram efetuadas em bases de dados e repositórios acadêmicos reconhecidos, entre os quais se destacaram o Google Acadêmico, a Scielo, o Portal de Periódicos CAPES, a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e repositórios institucionais de universidades. Para a localização dos materiais, utilizaram-se os descritores em português: Gestão da qualidade, Processos organizacionais, Inovação, Melhoria contínua e Competitividade; e, em inglês: *"quality management"*, *"process improvement"* e *"organizational innovation"*.

Como critérios de inclusão, foram considerados artigos científicos, dissertações, teses e livros publicados em português e inglês, no período delimitado entre 2016 e 2025, que apresentassem relação direta com a temática pesquisada. Já os critérios de exclusão abrangeram materiais sem rigor acadêmico, publicações duplicadas, trabalhos incompletos e estudos que não possuíam relação direta com os objetivos da pesquisa.

2 A IMPORTÂNCIA DOS PROCESSOS NA GESTÃO DA QUALIDADE

A literatura sobre gestão da qualidade converge ao reconhecer os processos como elemento central para o desempenho organizacional, mas diverge quanto à ênfase atribuída à sua formalização e flexibilidade. Para Paladini (2012), processos bem estruturados são condição essencial para garantir previsibilidade e redução de falhas, enquanto Nogueirol (2019) amplia essa visão ao destacar que o conhecimento detalhado dos processos não apenas reduz inconsistências, mas também sustenta a capacidade analítica da organização na identificação de gargalos e oportunidades de melhoria. Essa convergência sugere que a gestão da qualidade não se limita à existência de processos, mas depende do grau de compreensão e domínio que a organização possui sobre eles.

No que se refere à padronização, observa-se um debate relevante na literatura. Britto (2016) enfatiza a padronização como mecanismo de controle da variabilidade e redução de erros operacionais, enquanto Carpinetti e Gerolamo (2016) argumentam que sua eficácia depende do equilíbrio entre consistência e adaptabilidade. Essa tensão indica que, embora a padronização seja amplamente defendida como pilar da qualidade, sua aplicação excessivamente rígida pode limitar a capacidade de inovação e resposta a contextos dinâmicos. Assim, a literatura aponta para a necessidade de uma padronização orientada, que sirva como referência, mas não como restrição absoluta às práticas organizacionais.

A relação entre padronização e controle também é tratada de forma complementar, mas com nuances distintas entre os autores. Gonçalves (2020) associa o controle à utilização de indicadores e mecanismos formais de monitoramento, enfatizando sua função na identificação de desvios. Por outro lado, essa perspectiva pode ser ampliada ao considerar que o controle não deve ser apenas reativo, mas integrado a uma lógica preventiva e estratégica. Nesse sentido, a literatura

sugere que o controle eficaz depende menos da quantidade de instrumentos utilizados e mais da capacidade organizacional de interpretar dados e transformá-los em decisões.

A conexão entre processos e satisfação do cliente aparece como um ponto de consenso. Lizardo e Ribeiro (2020) defendem que processos bem estruturados impactam diretamente a confiabilidade das entregas e, consequentemente, a percepção de qualidade pelo cliente. No entanto, essa relação não é linear, pois depende da capacidade da organização de alinhar seus processos às expectativas do mercado. Assim, a literatura indica que a eficiência interna, por si só, não garante satisfação, sendo necessário um alinhamento contínuo entre processos e demandas externas.

No campo da melhoria contínua, há forte convergência teórica, mas com abordagens distintas quanto à sua operacionalização. Fundin *et al.* (2020) tratam a melhoria contínua como um princípio cultural organizacional, enquanto Carvalho *et al.* (2024) a apresentam como prática estruturada orientada por métodos e métricas. Essa diferença revela duas perspectivas complementares: uma voltada ao comportamento organizacional e outra aos instrumentos de gestão. A integração dessas abordagens parece ser fundamental para que a melhoria contínua deixe de ser apenas um discurso e se torne prática efetiva.

As ferramentas da qualidade, como o ciclo PDCA e o Diagrama de Ishikawa, são amplamente reconhecidas, mas sua efetividade é interpretada de maneira crítica na literatura. Paladini (2019) destaca seu papel na sistematização da análise e solução de problemas, porém estudos mais recentes sugerem que tais ferramentas, isoladamente, não garantem melhorias sustentáveis. Isso indica que sua aplicação depende do contexto organizacional, da maturidade da gestão e do engajamento das equipes, reforçando a ideia de que métodos são necessários, mas não suficientes.

Outro ponto relevante refere-se à integração organizacional promovida pela gestão por processos. Nogueirol (2019) defende que o mapeamento de processos contribui para reduzir a fragmentação entre setores, enquanto outras abordagens indicam que essa integração depende também de fatores culturais e comunicacionais. Assim, a literatura sugere que a visão sistêmica dos processos é condição necessária, mas não suficiente, para a cooperação organizacional efetiva.

A redução de custos é frequentemente apontada como consequência da gestão da qualidade, mas também apresenta diferentes interpretações. Lizardo e Ribeiro (2020) associam diretamente a eficiência dos processos à diminuição de desperdícios, enquanto outras abordagens indicam que a busca por redução de custos não deve comprometer a qualidade percebida. Esse ponto evidencia uma possível tensão entre eficiência operacional e valor entregue ao cliente, exigindo equilíbrio estratégico por parte das organizações.

Nesse sentido a capacidade de adaptação organizacional é destacada por Moço e Cunha (2020) como resultado do domínio dos processos. No entanto, essa perspectiva pode ser problematizada ao considerar que ambientes altamente dinâmicos exigem não apenas processos bem definidos, mas também flexíveis. Dessa forma, a literatura contemporânea aponta para uma evolução do conceito tradicional de processos, que deixa de ser exclusivamente estruturante e passa a incorporar elementos de adaptabilidade e aprendizagem organizacional.

Diante desse conjunto de contribuições, observa-se que os processos são, de fato, a base da gestão da qualidade, mas sua eficácia depende de como são concebidos, implementados e utilizados. Mais do que estruturas fixas, os processos devem ser entendidos como sistemas dinâmicos, capazes de equilibrar padronização e flexibilidade, controle e aprendizagem, eficiência interna e valor ao cliente. Essa interpretação reforça uma visão mais analítica e menos prescritiva da gestão da qualidade, alinhando-se às discussões contemporâneas da área.

3 RESULTADOS DA GESTÃO DA QUALIDADE NAS EMPRESAS

A gestão da qualidade tem se consolidado como um dos principais fatores para o aumento da competitividade organizacional, especialmente quando suas práticas são implementadas de forma sistêmica e integrada. Nesse sentido, Carpinetti e Gerolamo (2016) destacam que a adoção de normas como a ISO 9001:2015 permite estruturar processos e estabelecer padrões consistentes, enquanto Britto (2016) complementa ao enfatizar que a filosofia da Qualidade Total amplia esse impacto ao promover o uso eficiente de recursos e a eliminação de desperdícios. Assim, observa-se que a padronização e a melhoria contínua não apenas organizam os processos, mas também criam condições para ganhos simultâneos de eficiência e desempenho operacional.

Esse alinhamento entre estrutura e eficiência reflete diretamente no aumento da produtividade. Enquanto Britto (2016) associa esse resultado à otimização de recursos e à redução de falhas, Barbosa, Gambi e Gerolamo (2017) ampliam essa análise ao demonstrar que fatores humanos, especialmente a liderança, são determinantes para que esses ganhos se concretizem. Para os autores, estilos de liderança participativos e orientados a resultados potencializam o engajamento das equipes, o que reforça a ideia de que a produtividade não depende apenas de processos bem definidos, mas também da forma como as pessoas são conduzidas dentro da organização.

De maneira semelhante, a satisfação do cliente emerge como um resultado diretamente ligado tanto à padronização quanto ao controle dos processos. Carpinetti e Gerolamo (2016) apontam o foco no cliente como um dos pilares da qualidade, enquanto isso as auditorias de qualidade são instrumentos fundamentais para garantir esse foco na prática. Ao identificar não conformidades e assegurar a aderência aos padrões, as auditorias contribuem para a consistência dos produtos e serviços. Dessa forma, percebe-se que a satisfação do cliente não decorre apenas da intenção organizacional, mas de mecanismos concretos de controle e verificação.

Além disso, a redução de custos aparece como um resultado transversal às diferentes práticas da gestão da qualidade. Britto (2016) defende que a prevenção de erros é mais econômica do que sua correção, enquanto Becher (2017) reforça que auditorias contribuem para evitar desperdícios ao identificar falhas precocemente. Em conjunto, esses argumentos evidenciam que a diminuição de custos está diretamente relacionada tanto à melhoria dos processos quanto à eficácia dos mecanismos de controle, consolidando a qualidade como uma estratégia financeira, e não apenas operacional.

Com o avanço da Indústria 4.0, esses resultados tendem a se intensificar e adquirir novas dimensões. Carvalho *et al.* (2024) argumentam que a Qualidade

4.0 integra tecnologias digitais, análise de dados e automação, permitindo monitoramento em tempo real e decisões mais rápidas. Essa visão é complementada por Fundin *et al.* (2020), que ampliam a discussão ao afirmar que o futuro da qualidade estará associado à inovação, sustentabilidade e aprendizado organizacional. Assim, enquanto Carvalho *et al.* (2024) enfatizam os meios tecnológicos, Fundin *et al.* (2020) destacam as capacidades estratégicas, evidenciando que o avanço da qualidade envolve tanto ferramentas quanto mudança de mentalidade organizacional.

No contexto da Engenharia de Produção, Gonçalves (2026) destaca que a gestão da qualidade contribui diretamente para o aumento da produtividade, da confiabilidade dos processos e da redução de retrabalhos. Nesse sentido, a aplicação de práticas de padronização, monitoramento e melhoria contínua favorece maior eficiência operacional, redução de desperdícios e otimização dos resultados organizacionais. Além disso, a adoção de sistemas de gestão da qualidade fortalece a competitividade das organizações, ao promover maior controle dos processos produtivos e melhoria no desempenho empresarial.

Dessa forma, os resultados da gestão da qualidade vão além da melhoria isolada de processos. A produtividade é ampliada pela integração entre padronização e liderança; a satisfação do cliente é fortalecida pela combinação entre foco estratégico e auditorias; e a redução de custos decorre da prevenção de falhas e do controle sistemático. Em conjunto, esses fatores consolidam a gestão da qualidade como um elemento essencial para a competitividade e a sustentabilidade das organizações em ambientes cada vez mais dinâmicos.

4 INOVAÇÃO COMO DIFERENCIAL NA GESTÃO DA QUALIDADE

A inovação tem assumido papel estratégico na gestão da qualidade, configurando-se como elemento relevante para o aumento da eficiência organizacional, redução de falhas e atendimento às exigências dos clientes. Nesse contexto, Paladini (2012) e Nogueirol (2019) convergem ao afirmar que os sistemas de gestão da qualidade precisam acompanhar as transformações tecnológicas e organizacionais para manter a competitividade das empresas. Enquanto Paladini enfatiza a necessidade de adaptação contínua dos processos e da cultura organizacional, Nogueirol destaca a incorporação de novas tecnologias e ferramentas como fator essencial para ampliar a capacidade analítica e a tomada de decisão nas organizações.

Dessa forma, observa-se que a inovação não se limita apenas à introdução de tecnologias, mas também envolve mudanças nos métodos de gestão e nas estratégias organizacionais. Os autores se complementam ao demonstrar que a integração entre inovação e gestão da qualidade fortalece a melhoria contínua, aumenta a eficiência operacional e favorece respostas mais rápidas às demandas do mercado e dos clientes.

Entre as principais transformações destaca-se a adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0, como internet das coisas, inteligência artificial, automação e monitoramento em tempo real. Essas ferramentas possibilitam maior controle dos processos produtivos e administrativos, promovendo a coleta contínua de dados e subsidiando a tomada de decisão baseada em evidências. Tal avanço contribui para a identificação precoce de desvios e para a implementação de

ações corretivas e preventivas de forma mais ágil (Moço; Cunha, 2020).

A utilização de big data também representa uma inovação significativa no campo da gestão da qualidade. A análise de grandes volumes de dados permite integrar informações de diferentes áreas organizacionais, favorecendo a geração de conhecimento estratégico. Com o apoio de sistemas analíticos e indicadores de desempenho, torna-se possível identificar padrões, prever falhas e orientar melhorias contínuas, reduzindo a subjetividade nos processos decisórios (Paladini, 2019; Nogueirol, 2019).

No âmbito metodológico, destacam-se abordagens como Lean e Six Sigma, amplamente difundidas na Engenharia de Produção. O Lean concentra-se na eliminação de desperdícios e na otimização dos fluxos produtivos, enquanto o Six Sigma busca a redução da variabilidade e dos defeitos nos processos. A integração dessas metodologias potencializa os resultados organizacionais, promovendo maior eficiência operacional, padronização e controle estatístico dos processos. Dessa forma, a gestão da qualidade assume caráter preventivo e orientado por dados, em consonância com práticas contemporâneas da área (Santos, 2017).

A inovação na gestão da qualidade também envolve o desenvolvimento do conhecimento organizacional. A capacitação contínua dos colaboradores, aliada ao uso de sistemas de gestão do conhecimento, contribui para a formação de equipes mais preparadas para lidar com mudanças e resolver problemas complexos. Esse processo favorece a disseminação de boas práticas e fortalece a cultura de melhoria contínua dentro das organizações (Moço; Cunha, 2020).

A cultura organizacional, por sua vez, constitui fator determinante para o sucesso da implementação de inovações. A resistência a mudanças ainda é um desafio recorrente, especialmente em ambientes consolidados por práticas tradicionais. A literatura enfatiza a importância de promover uma cultura orientada à inovação, à aprendizagem contínua e ao engajamento dos colaboradores, de modo a viabilizar a efetiva incorporação de novas práticas de gestão da qualidade (Paladini, 2019).

Apesar dos benefícios, a implementação de inovações apresenta desafios relevantes, como a necessidade de investimentos, adaptação de infraestrutura, qualificação profissional e integração de tecnologias. Tais fatores podem representar barreiras, sobretudo para organizações de menor porte. Ainda assim, a adoção de práticas inovadoras na gestão da qualidade é apontada como elemento essencial para a sustentabilidade e competitividade organizacional no longo prazo (Moço; Cunha, 2020).

A inovação, portanto, consolida-se como componente fundamental da gestão da qualidade na Engenharia de Produção, ao possibilitar maior controle, eficiência e confiabilidade dos processos. A integração entre tecnologias digitais, metodologias estruturadas e desenvolvimento organizacional contribui para o aprimoramento contínuo dos sistemas de gestão, alinhando-os às demandas contemporâneas do ambiente produtivo (Paladini, 2012; Nogueirol, 2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão da qualidade demonstrou-se, ao longo deste trabalho, como um instrumento essencial para a melhoria contínua de processos e para o fortaleci-

mento da inovação nas organizações. Considerando o objetivo proposto, verificou-se que sua aplicação, quando estruturada e alinhada às estratégias organizacionais, contribui diretamente para o aumento da eficiência, redução de falhas e aprimoramento do desempenho operacional. Dessa forma, conclui-se que a gestão da qualidade não se limita ao controle de processos, mas atua como elemento integrador capaz de impulsionar mudanças e sustentar a competitividade no ambiente produtivo.

Em relação ao problema de pesquisa, foi possível compreender que a integração entre práticas tradicionais de qualidade e abordagens inovadoras, como o uso de tecnologias digitais e metodologias de melhoria contínua, potencializa os resultados organizacionais. No entanto, também se observou que a efetividade dessas práticas depende de fatores internos, como a cultura organizacional, o nível de capacitação dos colaboradores e a capacidade de adaptação às mudanças. Assim, embora os objetivos tenham sido atingidos de forma satisfatória, reconhece-se que a implementação plena da gestão da qualidade ainda enfrenta desafios que podem limitar seus resultados em determinados contextos.

Entre as principais limitações do estudo, destaca-se a abordagem teórica baseada em revisão bibliográfica, o que restringe a análise à interpretação de autores e não contempla a aplicação prática em organizações específicas. Além disso, a diversidade de contextos organizacionais pode influenciar a forma como a gestão da qualidade é implementada, dificultando a generalização dos resultados. Como recomendação, sugere-se a realização de estudos empíricos que investiguem a aplicação prática dessas ferramentas em diferentes setores, bem como pesquisas que explorem mais profundamente a relação entre inovação tecnológica e qualidade. Dessa forma, abre-se espaço para trabalhos futuros que contribuam para o avanço do conhecimento e para a consolidação de práticas mais eficazes na área.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, F. M.; GAMBI, L. do N.; GEROLAMO, M. C. Liderança e gestão da qualidade: um estudo correlacional entre estilos de liderança e princípios da gestão da qualidade. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 3, p. 438–449, 2017.
- BRITTO, E. **Qualidade Total**. 1. Ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. 98 p.
- CARPINETTI, L. C. R.; GEROLAMO, M. C. **Gestão da Qualidade ISO 9001:2015: Requisitos e Integração com a ISO 14001:2015**. São Paulo: Atlas, 2016.
- CARVALHO, A. M. et al. The quality 4.0 roadmap: designing a capability roadmap toward quality management in industry 4.0. **Quality Management Journal**, v. 31, n. 2, p. 117–137, 2024.
- FUNDIN, A. et al. Quality 2030: quality management for the future. **Total Quality Management & Business Excellence**, p. 1–17, 2020.
- GONÇALVES, K. M. **A importância do controle de qualidade no laboratório de análises clínicas: Uma revisão bibliográfica**. Repositório Institucional UFU, Trabalho de Conclusão de Curso, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30180>. Acesso em: 01 mar. 2026.
- LIZARDO, C., RIBEIRO, P. **A importância da gestão da qualidade e aplicação das suas ferramentas na logística com vista à satisfação dos clientes**. *Gestão E Desenvolvimento*, (28), 3-28, 2020.
- MOÇO, P. A. B.; CUNHA, P. H. B. Análise da implementação da indústria 4.0 nas gestões de qualidade e de conhecimento. **Revista Boletim do Gerenciamento**, n. 16, 2020.
- NOGUEIROL, R. **Gestão da Qualidade**. 2. Ed. São Paulo: Érica, 2019, 216 p.

PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade**: Teoria e Casos. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

PALADINI, Edson P. **Gestão da Qualidade - Teoria e Prática**. Disponível em: Minha Biblioteca, 4. ed. Grupo GEN, 2019.

SANTOS, Patrícia Fonseca. **Estudo da Gestão da Qualidade Total e sua influência na produtividade industrial**. 2017. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

QUEIROZ, É. N. Controle de qualidade laboratorial e os principais erros analíticos: uma revisão bibliográfica. **Attena** - Repositório Digital da UFPE, TCC, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45432>. Acesso em: 11 mar. 2026.



Capítulo 13

GESTÃO DA MANUTENÇÃO: O PAPEL DO PCM NA PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL

A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW MAINTENANCE MANAGEMENT: THE ROLE OF PCM IN INDUSTRIAL PRODUCTIVITY

Ronald Gabriel Pereira Costa¹

Antônio Merval Machado Tavares²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

O presente trabalho aborda a importância do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) no contexto industrial, destacando seu papel estratégico na garantia da disponibilidade, confiabilidade e segurança dos ativos produtivos. Em um cenário marcado pela competitividade, pela busca por eficiência operacional e pela redução de custos, a manutenção deixa de ser apenas uma atividade corretiva e passa a integrar a gestão organizacional como elemento fundamental para a sustentabilidade dos processos produtivos. O objetivo geral do estudo consiste em analisar a relevância do PCM no ambiente industrial, bem como compreender de que forma sua implementação impacta a produtividade e a eficiência operacional das empresas. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e descritiva, fundamentada em artigos científicos, livros e publicações especializadas sobre manutenção industrial, com ênfase em trabalhos recentes. Ao longo do desenvolvimento, são discutidos os principais tipos de manutenção, incluindo corretiva, preventiva, preditiva, detectiva e a Manutenção Produtiva Total, além da atuação da engenharia de manutenção e dos pilares que sustentam o PCM. Os resultados evidenciam que a adoção estruturada do Planejamento e Controle da Manutenção contribui para a redução de paradas não programadas, otimização de recursos, melhoria dos indicadores de desempenho e alinhamento da manutenção aos objetivos estratégicos organizacionais.

Palavras-chave: Manutenção Produtiva Total; PCM; Controle.

Abstract

This study addresses the importance of Maintenance Planning and Control (MPC) within the industrial context, highlighting its strategic role in ensuring the availability, reliability, and safety of productive assets. In a scenario characterized by increasing competitiveness, the pursuit of operational efficiency, and cost reduction, maintenance is no longer viewed solely as a corrective activity but becomes an integral part of organizational management and a key element for the sustainability of production processes. The general objective of this study is to analyze the relevance of Maintenance Planning and Control in the industrial environment and to understand how its implementation impacts productivity and operational efficiency in organizations. Methodologically, this research is characterized as a qualitative and descriptive bibliographic review, based on scientific articles, books, and specialized publications on industrial maintenance, with emphasis on recent studies. Throughout the study, the main types of maintenance are discussed, including corrective, preventive, predictive, detective maintenance, and Total Productive Maintenance (TPM), as well as the role of maintenance engineering and the pillars that support the MPC framework. The results demonstrate that the structured adoption of Maintenance Planning and Control contributes to reducing unplanned downtime, optimizing resources, improving performance indicators, and aligning maintenance activities with organizational strategic objectives.

Keywords: Total Productive Maintenance; Maintenance Planning and Control (MPC); Control.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção industrial tem assumido um papel cada vez mais estratégico nas organizações contemporâneas, especialmente em um cenário marcado pela crescente complexidade dos sistemas produtivos e pela intensificação da competitividade global.

Tradicionalmente associada a ações corretivas ou preventivas, a manutenção passou a ser compreendida como um elemento essencial para a confiabilidade operacional, a segurança dos processos e a sustentabilidade econômica das empresas. Nesse contexto, sua gestão deixou de ter um caráter meramente operacional para integrar-se às decisões estratégicas organizacionais.

Com o advento da Indústria 4.0, esse processo de transformação tornou-se ainda mais evidente. A incorporação de tecnologias digitais avançadas, como sensores inteligentes, sistemas ciberfísicos, internet das coisas (IoT), redes de comunicação industrial e algoritmos de aprendizado de máquina, tem possibilitado a coleta e análise de grandes volumes de dados em tempo real.

Nesse novo ambiente tecnológico, os modelos tradicionais de manutenção corretiva e preventiva vêm sendo progressivamente complementados ou substituídos por abordagens mais avançadas, como a manutenção preditiva e a manutenção prescritiva. Essas estratégias utilizam análises estatísticas e técnicas de inteligência artificial para prever o comportamento dos equipamentos e recomendar ações específicas antes que ocorram falhas, contribuindo para a redução de custos operacionais, o aumento da disponibilidade dos ativos e a melhoria da confiabilidade dos processos produtivos.

Apesar dos benefícios associados a essas transformações, a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 na gestão da manutenção também impõe desafios relevantes às organizações. Entre eles, destacam-se a necessidade de investimentos em infraestrutura tecnológica, a qualificação e capacitação de profissionais, a reestruturação de processos internos e a integração entre sistemas físicos e digitais.

Diante desse cenário, emerge o seguinte problema de pesquisa: como a gestão estratégica da manutenção industrial tem sido redesenhada na era da Indústria 4.0? A resposta a essa questão é fundamental para compreender de que forma as organizações estão incorporando tecnologias digitais às suas estratégias de manutenção e quais impactos essas transformações têm gerado em termos de desempenho, eficiência e competitividade.

O objetivo geral deste estudo foi analisar como a gestão estratégica da manutenção industrial foi impactada pelas tecnologias da Indústria 4.0. De forma específica, buscou-se compreender as principais mudanças promovidas por esse novo paradigma tecnológico na gestão da manutenção, bem como identificar os benefícios e os desafios relacionados à adoção de estratégias de manutenção preditiva e prescritiva, a partir de uma revisão sistemática da literatura científica sobre o tema.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O presente estudo foi conduzido por meio de uma pesquisa do tipo Revisão Bibliográfica, caracterizada como qualitativa e descritiva. Esse método permitiu compreender, analisar e organizar informações já publicadas acerca do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) no ambiente industrial, sem a realização de intervenções experimentais ou análises quantitativas. A revisão bibliográfica mostrou-se apropriada para o desenvolvimento do trabalho, pois possibilitou a consolidação de conhecimentos teóricos sobre os tipos de manutenção, as estratégias de gestão e os sistemas informatizados aplicados à manutenção industrial.

A seleção do material baseou-se em artigos científicos, livros especializados e publicações de periódicos, com ênfase em trabalhos publicados nos últimos dez anos, o que garantiu a atualidade e a relevância das informações. Foram incluídos artigos publicados em português e inglês, enquanto foram excluídos artigos de revisão, primeiras impressões, resumos de congressos ou materiais que não apresentaram conteúdo completo e validado.

As buscas bibliográficas foram realizadas em bases de dados confiáveis, como *SciELO*, *Google Scholar* e *ResearchGate*, além de consultas a livros e materiais técnicos especializados em manutenção industrial. Os descritores e palavras-chave utilizados na pesquisa incluíram: “Planejamento e Controle da Manutenção”, “PCM industrial”, “manutenção preventiva”, “manutenção preditiva” e “sistemas informatizados de manutenção”. A organização e a análise das informações coletadas permitiram a construção de uma visão abrangente do tema, fundamentando teoricamente os objetivos do estudo.

2.2 Resultados e Discussão

A palavra “manutenção” tem origem na expressão latina *manus tenere*, que remete à ideia de conservar, sustentar ou manter algo em condições de uso. Desde os primórdios das atividades humanas, quando o homem começou a fabricar e utilizar ferramentas e instrumentos para a produção, já havia a preocupação em preservar esses objetos para garantir sua continuidade de uso (Marques; Brito, 2019).

De forma geral, considera-se manutenção toda ação voltada a assegurar que um equipamento permaneça em pleno funcionamento, com níveis adequados de disponibilidade e confiabilidade (Marques; Brito, 2019). Essas ações envolvem não apenas as intervenções técnicas realizadas diretamente pelos profissionais responsáveis, mas também o planejamento necessário para que essas intervenções ocorram de maneira eficiente, preventiva e estratégica (Boeira, 2022).

No contexto industrial e organizacional, a manutenção costuma ser dividida em três categorias principais, o que permite compreender melhor as estratégias utilizadas para prevenir falhas, otimizar recursos e garantir a continuidade produtiva (Boeira, 2022). A aplicação adequada dessas modalidades colabora para a redução de custos, o aumento da vida útil dos equipamentos e a melhoria do desempenho operacional, impactando positivamente a produtividade e a segurança nas operações (Santos *et al.*, 2021).

2.2.1 Tipos de manutenção

Conforme Pires *et al.* (2018), a gestão da manutenção exige a escolha de estratégias que assegurem a continuidade das operações. Entre as principais modalidades estão a manutenção corretiva, preventiva, preditiva, detectiva, produtiva total e a engenharia de manutenção. Cada tipo apresenta objetivos distintos, desde a correção após falhas até a antecipação de problemas por monitoramento com esta definição adequada depende da criticidade dos equipamentos e das demandas operacionais.

De acordo com Da Rosa *et al.* (2020), práticas mais modernas de manutenção vêm sendo incorporadas para otimizar os resultados produtivos. A manutenção detectiva identifica falhas não visíveis, enquanto a produtiva total busca a melhoria contínua do desempenho dos equipamentos em que a escolha da modalidade ideal deve considerar o planejamento estratégico e os recursos disponíveis.

Conforme Pires *et al.* (2018), a manutenção corretiva é caracterizada pelo reparo de equipamentos apenas quando estes apresentam falhas ou deixam de funcionar, sendo a forma mais direta de intervenção. Historicamente, muitas indústrias adotavam esse modelo, aguardando que os equipamentos apresentassem problemas antes de realizar qualquer tipo de conserto.

Segundo Mariano (2020), a manutenção corretiva é caracterizada pelo reparo de equipamentos apenas quando estes apresentam falhas ou deixam de funcionar, sendo a forma mais direta de intervenção. Historicamente, muitas indústrias adotavam esse modelo, aguardando que os equipamentos apresentassem problemas antes de realizar qualquer tipo de conserto.

De acordo com Da Rosa *et al.* (2020), esse tipo de manutenção inclui ações como reparos, ajustes, substituição de peças ou até mesmo a troca completa do equipamento, dependendo da gravidade da falha. Embora simples de implementar, a manutenção corretiva pode gerar custos elevados para a empresa, pois a espera pela falha pode resultar em danos adicionais a outros componentes do equipamento, aumentando o tempo de parada e afetando a produtividade.

Segundo Mariano (2020), a abordagem baseia-se no conhecimento da degradação natural dos equipamentos, permitindo que intervenções sejam realizadas de forma programada, antes que o desgaste comprometa seu desempenho. As ações podem incluir ajustes, lubrificação, substituição de peças ou inspeções periódicas, sempre com foco em evitar paradas não planejadas.

Segundo Sales *et al.* (2020), a manutenção preditiva é um método avançado de gestão de equipamentos que se baseia no monitoramento contínuo do desempenho das máquinas para determinar o momento ideal de intervenção. Esse tipo de manutenção permite identificar sinais de desgaste ou falhas iminentes antes que comprometam o funcionamento do equipamento, evitando paradas inesperadas e otimizando o uso de recursos.

De acordo com Muduc (2021), por meio da análise de indicadores de condição, como vibração, temperatura e desempenho operacional, é possível planejar ações de manutenção com maior precisão. Esse acompanhamento reduz a necessidade de reparos emergenciais, prolonga a vida útil de máquinas e componentes, melhora a eficiência operacional e contribui para a redução de custos e aumento da confiabilidade dos processos industriais.

Segundo Mariano (2020), a manutenção detectiva tem como objetivo identificar falhas ocultas em sistemas de proteção que não são percebidas facilmente pelo pessoal de operação e manutenção. Essas ações são essenciais para garantir a confiabilidade dos equipamentos e devem ser realizadas por profissionais capacitados, muitas vezes com o apoio do pessoal de operação, especialmente em sistemas complexos.

Conforme Pires *et al.* (2018), essa modalidade se diferencia por realizar diagnósticos diretamente no local da manutenção, utilizando informações obtidas junto à planta industrial. Embora envolva algum risco de avarias nos próprios sistemas de detecção, a manutenção detectiva contribui significativamente para a redução de paradas não programadas, garantindo maior segurança e continuidade operacional.

2.2.2 Manutenção Produtiva Total

A Manutenção Produtiva Total (TPM) é um método de origem japonesa voltado para a melhoria contínua das máquinas e para a otimização dos processos produtivos. Esse enfoque envolve todos os colaboradores da empresa, promovendo não apenas a eficiência operacional, mas também a qualidade do produto final e a valorização dos funcionários no ambiente de trabalho (Marques; Brito, 2019).

O TPM surgiu no Japão após a Segunda Guerra Mundial como uma estratégia para reconstruir o setor industrial e aumentar a competitividade das empresas. Seu objetivo central é reduzir desperdícios, evitar defeitos nos produtos e produzir com eficiência, mesmo em pequenas quantidades, garantindo que os produtos cheguem ao consumidor sem falhas (Boeira, 2022).

A aplicação da TPM se expandiu para outras áreas organizacionais, como desenvolvimento e vendas. Essa versatilidade demonstra a importância do método não apenas para manutenção, mas também para a melhoria contínua e o fortalecimento da competitividade organizacional em diversos contextos empresariais (Santos *et al.*, 2022).

A Engenharia de Manutenção surgiu como uma abordagem estratégica para gerir os recursos e processos de manutenção de maneira eficiente, com foco na redução de custos e aumento da produtividade. Essa prática busca identificar e eliminar as causas de falhas recorrentes, ao invés de apenas realizar reparos corretivos, promovendo melhorias contínuas nos sistemas produtivos (Da Rosa *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, a aplicação da Engenharia de Manutenção tornou-se essencial para empresas que desejam manter elevados padrões de operação. Ela contribui para a redução de interrupções, aumento da confiabilidade de máquinas e equipamentos, além de garantir que a equipe de manutenção seja utilizada de forma eficiente, evitando ociosidade (Pires *et al.*, 2018).

A correta implementação dessa engenharia permite que as empresas melhorem a qualidade dos produtos e serviços, aumentem a produção e mantenham níveis de atendimento satisfatórios. A prática envolve planejamento, gestão de recursos e análise técnica detalhada dos equipamentos, buscando sempre o aprimoramento dos processos (Siqueira; Souza, 2022).

2.2.3 Pilares do PCM

No contexto organizacional o planejamento está dividido em três âmbitos, são eles: estratégico, tático e operacional, detalhados na figura 1. Que podem ser aplicados desde em pequenos projetos até projetos de grande porte que requer controle e acompanhamento de maior complexibilidade e envolvem custos em maiores escalas (Viana, 2022).



Figura 1. Revoluções industriais.

Fonte: Adaptado Freitas (2016).

O Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) é estruturado a partir de seis pilares fundamentais — documentação, histórico, padronização, estratégia, tecnologia e informação — os quais possuem igual nível de importância e sustentam a organização da manutenção. Esses pilares facilitam a implantação do PCM e promovem a compreensão da nova forma de trabalho a ser adotada pelos colaboradores, servindo como base para a estrutura organizacional do setor (Si-queira; Souza, 2022).

A documentação e o histórico constituem elementos essenciais para a tomada de decisão, pois envolvem a coleta, o registro e o arquivamento sistemático de dados oriundos das rotinas de manutenção, como ordens de serviço, relatórios, fichas técnicas e inspeções. Esses registros, quando organizados de forma lógica e segura, permitem a análise do desempenho dos equipamentos ao longo do tempo, apoiando decisões operacionais e gerenciais mais assertivas (Viana, 2022).

A padronização, a estratégia, a tecnologia e a informação completam a estrutura do PCM, promovendo organização, eficiência e visão estratégica da manutenção. A identificação lógica dos ativos, o uso de ferramentas tecnológicas e a disponibilidade de informações técnicas contribuem para a otimização de recursos e custos (Viana, 2022).

2.2.4 O setor de planejamento e controle da manutenção

Siqueira e Souza (2022) destacam que o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) consiste em um conjunto de ações voltadas para preparar, programar e acompanhar a execução das tarefas de manutenção, utilizando parâmetros previamente definidos.

Teles (2019b) observa que o setor de PCM está vinculado à Divisão de Manutenção, departamento responsável pela gestão de toda a manutenção da fábrica. Sob a coordenação de um gerente com formação em engenharia elétrica, são dirigidas as equipes de manutenção elétrica, mecânica e civil. Essa estrutura centralizada permite que as operações de manutenção sejam planejadas e executadas de forma uniforme, garantindo maior eficiência e melhor aproveitamento do pessoal.

Vianna (2022) aponta que o PCM utiliza um software que auxilia na geração e acompanhamento de ordens de serviço, sejam elas preventivas, corretivas ou preditivas. Após a criação das ordens, as equipes de manutenção realizam as atividades programadas, devolvendo os registros preenchidos com informações detalhadas sobre os serviços executados.

Xenos (2017) enfatiza que, com os dados obtidos das ordens de serviço, o setor de PCM elabora planejamentos, relatórios e indicadores de desempenho para cada equipamento. Dessa forma, é possível criar um banco de dados confiável que subsidia análises estratégicas e decisões sobre a manutenção. O uso do software permite monitorar o desempenho dos equipamentos e definir a melhor forma de atuação, assegurando maior disponibilidade e eficiência operacional para a produção da empresa.

O Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) consiste em um conjunto de ações voltadas para preparar, programar e acompanhar a execução das tarefas de manutenção, utilizando parâmetros previamente definidos. Além disso, permite adotar medidas corretivas frente a desvios, contribuindo para o alcance dos objetivos estratégicos da empresa (Siqueira; Souza, 2022).

O setor de PCM está vinculado à Divisão de Manutenção, departamento responsável pela gestão de toda a manutenção da fábrica. Sob a coordenação de um gerente com formação em engenharia elétrica, são dirigidas as equipes de manutenção elétrica, mecânica e civil (Vianna, 2022). Essa estrutura centralizada permite que as operações de manutenção sejam planejadas e executadas de forma uniforme, garantindo maior eficiência e melhor aproveitamento do pessoal (Teles, 2019a).

O PCM utiliza um software que auxilia na geração e acompanhamento de ordens de serviço, sejam elas preventivas, corretivas ou preditivas. Após a criação das ordens, as equipes de manutenção realizam as atividades programadas, devolvendo os registros preenchidos com informações detalhadas sobre os serviços executados (Vianna, 2022).

Com os dados obtidos das ordens de serviço, o setor de PCM elabora planejamentos, relatórios e indicadores de desempenho para cada equipamento. Dessa forma, é possível criar um banco de dados confiável que subsidia análises estratégicas e decisões sobre a manutenção (Vianna, 2022). O uso do software permite monitorar o desempenho dos equipamentos e definir a melhor forma de atuação, assegurando maior disponibilidade e eficiência operacional para a produção da empresa (Xenos, 2017).

3 CONCLUSÃO

O presente estudo possibilitou analisar de forma consistente a importância do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) no ambiente industrial, evidenciando seu papel estratégico na gestão dos ativos produtivos. À luz dos objetivos propostos — compreender a função do PCM, analisar os diferentes tipos de manutenção e avaliar seus impactos na eficiência operacional — verifica-se que foram plenamente alcançados, uma vez que se demonstrou como o PCM contribui para a organização sistemática das atividades, otimização de recursos e redução de falhas operacionais.

No que se refere ao problema de pesquisa — compreender de que forma o Planejamento e Controle da Manutenção influencia o desempenho e a confiabilidade dos sistemas industriais — conclui-se que sua atuação é determinante para a melhoria dos indicadores operacionais. A aplicação integrada de estratégias de manutenção corretiva, preventiva, preditiva e detectiva, associada a abordagens como a Manutenção Produtiva Total e a engenharia de manutenção, mostrou-se essencial para reduzir paradas não programadas, aumentar a vida útil dos equipamentos e promover a melhoria contínua dos processos produtivos.

Observou-se, portanto, que o PCM não se limita a uma função operacional, mas assume um caráter estratégico, contribuindo diretamente para a competitividade, sustentabilidade e segurança das organizações industriais. Sua implementação eficaz permite maior previsibilidade dos processos, tomada de decisão baseada em dados e melhor desempenho global dos sistemas produtivos.

Como limitação do estudo, destaca-se o caráter exclusivamente bibliográfico da pesquisa, o que restringe a análise à perspectiva teórica, sem validação empírica em ambientes industriais reais. Dessa forma, recomenda-se que trabalhos futuros explorem estudos de caso e aplicações práticas, a fim de investigar, de maneira mais aprofundada, os impactos do PCM em diferentes contextos organizacionais e setores industriais.

Em síntese, o estudo reforça a relevância do Planejamento e Controle da Manutenção como um elemento fundamental para a excelência operacional, convidando o leitor a refletir sobre sua adoção não apenas como uma ferramenta técnica, mas como um diferencial estratégico no cenário industrial contemporâneo.

REFERÊNCIAS

- BOEIRA, Felipe de Souza. **Estudo e análise de falhas em pás carregadeiras baseadas na manutenção centrada em confiabilidade**. 2022.
- DA ROSA, Silvio Cesar Ferreira et al. **Análise da Gestão da Manutenção em uma empresa de transformação de polímeros**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 6, n. 3, p. 0377-0382, 2020.
- MARIANO, Gustavo Henrique Costa. **Manutenção preventiva corretiva em edificações: uma revisão de literatura**. Engineering Sciences, v. 8, n. 2, p. 10-17, 2020.
- MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. **Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos**. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019.
- MUDUC, Sabina. **Análise de custo-benefício da manutenção corretiva versus manutenção preventiva das infraestruturas da Guarda Nacional Republicana**. 2021.

PIRES, Cinthia et al. **Importância da criticidade de equipamentos na gestão da manutenção.** Belo Horizonte: Centro Universitário de Belo Horizonte, 2018.

SALES, Neirismar dos Santos et al. **A importância da padronização da manutenção corretiva e preventiva como redução de tempo.** 2020.

SANTOS, Bruna Luiza Pinto et al. **Aplicação da engenharia da confiabilidade na manutenção de sistemas reparáveis:** uma revisão sistemática da literatura. XLII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2022.

SIQUEIRA, Geovanna Carolline do Carmo; SOUZA, Jorge Augusto Panferrode. **Planejamento e controle de manutenção em uma empresa de produção de café.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5402>. Acesso em: 30 fev. 2026.

TELES, Jhonata. **Bíblia do RCM: O guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na era da indústria 4.0.** Brasília: Engeteles, 2019. ISBN 978-65-900514-1-7.

TELES, Jhonata. **Planejamento e Controle da Manutenção:** Uma metodologia passo a passo para implantação do PCM. 2. ed. Brasília: Engeteles, 2019. ISBN 978-65-900514-0-0.

VIANNA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM: Planejamento e Controle da Manutenção.** 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2022. ISBN 978-8541404099.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva:** O caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. 2. ed. Nova Lima: Falconi, 2017.



Capítulo 14

GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO DE LITERATURA

CONSTRUCTION WASTE MANAGEMENT: A LITERATURE REVIEW

Adriana Monteiro Ribeiro¹

Mirian Nunes de Carvalho Nunes²

¹ Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

O presente trabalho discute a gestão de resíduos da construção civil a partir de uma revisão de literatura, considerando a relevância ambiental e científica associada à geração de resíduos no setor construtivo. O estudo parte do problema que busca compreender quais abordagens e contribuições são apresentadas pela literatura científica acerca da gestão de resíduos da construção civil e de sua relação com a sustentabilidade. Nesse contexto, estabelece-se como objetivo geral discutir os principais aspectos relacionados à gestão desses resíduos e sua importância para práticas sustentáveis na construção civil. Para alcançar esse propósito, são descritos os conceitos relacionados à geração de resíduos no setor, bem como discutidas as estratégias de gerenciamento e as perspectivas associadas à sustentabilidade e à economia circular. A metodologia caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa e descritiva do tipo revisão bibliográfica, desenvolvida a partir da análise de produções científicas publicadas entre 2016 e 2026, consultadas nas bases de dados Google Acadêmico e SciELO. A seleção dos estudos considera publicações em português e inglês relacionadas à temática investigada. A análise da literatura evidencia que a gestão adequada dos resíduos da construção civil representa elemento fundamental para reduzir impactos ambientais e favorecer práticas sustentáveis no setor construtivo. Conclui-se que a produção científica aponta a necessidade de ampliar estratégias de gerenciamento, reaproveitamento e reciclagem de materiais, contribuindo para a consolidação de modelos construtivos mais responsáveis e alinhados aos princípios da sustentabilidade.

Palavras-chave: Sustentabilidade urbana. Gerenciamento ambiental. Economia circular. Reciclagem de materiais. Impactos ambientais.

Abstract

This paper discusses construction waste management through a literature review, considering the environmental and scientific relevance associated with waste generation in the construction sector. The study begins with the problem of understanding which approaches and contributions are presented by the scientific literature regarding construction waste management and its relationship with sustainability. In this context, the general objective is to discuss the main aspects related to the management of this waste and its importance for sustainable practices in civil construction. To achieve this purpose, the concepts related to waste generation in the sector are described, as well as the management strategies and perspectives associated with sustainability and the circular economy. The methodology is characterized as a qualitative and descriptive bibliographic review, developed from the analysis of scientific productions published between 2016 and 2026, consulted in the Google Scholar and SciELO databases. The selection of studies considers publications in Portuguese and English related to the investigated theme. The literature analysis shows that the proper management of construction waste is a fundamental element for reducing environmental impacts and promoting sustainable practices in the construction sector. It is concluded that scientific production points to the need to expand strategies for managing, reusing, and recycling materials, contributing to the consolidation of more responsible construction models aligned with the principles of sustainability.

Keywords: Urban sustainability. Environmental management. Circular economy. Material recycling. Environmental impacts.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das atividades relacionadas à construção civil tem ampliado significativamente o debate acadêmico sobre os impactos ambientais associados ao setor, especialmente no que se refere à geração de resíduos sólidos. As obras de construção, reforma e demolição produzem grandes volumes de materiais descartados, que incluem concreto, argamassa, cerâmicas, metais e outros componentes provenientes dos processos construtivos (Andrade *et al.*, 2021).

Paralelamente a essa discussão, o avanço das preocupações ambientais tem impulsionado a incorporação de práticas sustentáveis no contexto da construção civil, especialmente aquelas voltadas ao gerenciamento adequado de resíduos e à adoção de modelos produtivos mais eficientes. Nesse contexto, a literatura recente tem destacado a relevância de estratégias baseadas na reutilização e na reciclagem de materiais, bem como na aplicação de princípios associados à economia circular. Essas abordagens contribuem para reduzir a extração de recursos naturais e para promover uma gestão mais responsável dos resíduos gerados pelas atividades construtivas (Rodrigues, 2022).

A relevância do tema torna-se ainda mais evidente quando se considera o volume expressivo de resíduos provenientes da construção civil e os impactos ambientais decorrentes de sua disposição inadequada. A ausência de práticas eficientes de gerenciamento pode resultar em problemas ambientais significativos, como contaminação do solo, degradação de áreas urbanas e sobrecarga de sistemas de destinação final de resíduos. Nesse sentido, este estudo se justifica pela necessidade de aprofundar a compreensão teórica acerca da gestão de resíduos da construção civil, reunindo e discutindo contribuições presentes na literatura científica recente sobre o tema.

Diante desse contexto, surge o seguinte problema de pesquisa: quais abordagens e contribuições são apresentadas pela literatura científica recente acerca da gestão de resíduos da construção civil e de sua relevância para a sustentabilidade no setor da construção? A formulação dessa questão busca orientar a análise da produção acadêmica existente, permitindo compreender de que maneira os estudos científicos têm discutido os desafios e as possibilidades relacionados ao gerenciamento desses resíduos no âmbito das atividades construtivas.

A partir dessa problemática, estabelece-se como objetivo geral discutir, com base na literatura científica, os principais aspectos relacionados à gestão de resíduos da construção civil e sua importância para práticas sustentáveis no setor. Para alcançar esse propósito, definem-se como objetivos específicos: descrever os principais conceitos e características relacionados aos resíduos gerados nas atividades da construção civil; apontar as estratégias e diretrizes presentes na produção científica voltadas à gestão e ao manejo adequado desses resíduos; e comparar diferentes perspectivas apresentadas em estudos recentes acerca dos desafios e das possibilidades relacionadas à gestão de resíduos no contexto da construção civil.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa e descritiva, desenvolvida com o objetivo de reunir, organizar e discutir produções científicas relacionadas à gestão de resíduos da construção civil, bem como às abordagens associadas à sustentabilidade e à economia circular no setor construtivo. Esse tipo de investigação fundamenta-se na análise de estudos previamente publicados, permitindo compreender como o tema tem sido abordado na literatura científica recente. Dessa forma, a revisão bibliográfica possibilita identificar conceitos, discussões teóricas e perspectivas apresentadas por diferentes autores, contribuindo para a construção de uma compreensão mais ampla acerca do objeto de estudo.

Para a realização da busca bibliográfica, são utilizadas bases de dados reconhecidas no meio acadêmico, especialmente Google Acadêmico e SciELO, por reunirem amplo acervo de produções científicas nacionais e internacionais. A seleção dos estudos ocorre a partir de publicações disponíveis em artigos científicos, trabalhos acadêmicos, dissertações, teses e demais documentos científicos que abordam a temática investigada. A delimitação temporal da pesquisa compreende trabalhos publicados entre os anos de 2016 e 2026, com o propósito de priorizar produções mais recentes e alinhadas às discussões contemporâneas sobre sustentabilidade e gestão de resíduos na construção civil.

Durante o processo de busca, são utilizados descritores e combinações de palavras-chave relacionadas ao tema da pesquisa, tais como “resíduos da construção civil”, “gestão de resíduos da construção civil”, “sustentabilidade na construção civil”, “economia circular na construção civil” e “reciclagem de resíduos de construção e demolição”. Esses termos são aplicados individualmente e em diferentes combinações nos mecanismos de busca das bases consultadas, com o objetivo de ampliar a identificação de estudos relevantes para a discussão proposta.

No que se refere aos critérios de inclusão, são considerados estudos publicados em português e inglês, disponíveis integralmente nas bases de dados consultadas e que apresentam relação direta com a temática da gestão de resíduos da construção civil e suas implicações para a sustentabilidade no setor. Também são incluídos artigos de revisão, pesquisas qualitativas e quantitativas, desde que contribuam para o aprofundamento teórico do tema investigado. Por outro lado, são excluídos materiais que não apresentam relação direta com o objeto da pesquisa, bem como textos incompletos, resumos simples, primeiras versões de trabalhos acadêmicos ou documentos sem respaldo científico.

Após a seleção das publicações, procede-se à leitura analítica dos estudos, buscando identificar os principais conceitos, discussões e contribuições apresentadas na literatura sobre a temática investigada. A partir desse processo, as informações são organizadas e discutidas ao longo do trabalho, permitindo estabelecer um panorama teórico sobre a gestão de resíduos da construção civil, suas características e as perspectivas associadas à sustentabilidade e à economia circular no setor construtivo. Dessa maneira, a revisão bibliográfica possibilita sistematizar o conhecimento existente na literatura e contribuir para o avanço das discussões acadêmicas relacionadas ao tema.

2.2 Resultados e Discussão

A compreensão da natureza dos resíduos gerados pela construção civil constitui etapa fundamental para o avanço das discussões relacionadas à sustentabilidade no setor construtivo. Em razão do elevado volume de materiais descartados durante as etapas de execução, reforma e demolição de edificações, a literatura científica tem enfatizado a necessidade de investigar com maior profundidade a composição e as características desses resíduos. Nesse contexto, estudos apontam que o setor da construção civil figura entre os principais responsáveis pela geração de resíduos sólidos nas áreas urbanas, fator que reforça a relevância de pesquisas voltadas à identificação e caracterização desses materiais (Andrade *et al.*, 2021).

Sob uma perspectiva conceitual, os resíduos da construção civil são compreendidos como materiais resultantes de processos construtivos que não são incorporados à estrutura final das obras. Entre os exemplos mais frequentes encontram-se fragmentos de concreto, argamassa, blocos cerâmicos, madeira, metais e outros elementos descartados ao longo das diferentes fases do processo produtivo. A literatura destaca que essa diversidade de materiais confere aos resíduos características físicas e químicas bastante variadas, o que torna indispensável a realização de estudos voltados à sua classificação e ao entendimento de seu comportamento ambiental (Leal, 2021).

A heterogeneidade desses resíduos também está diretamente relacionada às técnicas construtivas utilizadas e às particularidades de cada empreendimento. Diferentes métodos de construção, bem como variações nos processos de transporte, armazenamento e manuseio de materiais, influenciam significativamente a quantidade e o tipo de resíduos gerados. Por esse motivo, parte significativa das pesquisas recentes tem buscado mapear as principais fontes de geração de resíduos no setor construtivo, contribuindo para a construção de diagnósticos mais precisos sobre o problema (Meiros, 2021).

Além dos aspectos relacionados à composição material, a literatura também enfatiza a importância de compreender o contexto mais amplo no qual esses resíduos são produzidos. O crescimento acelerado das cidades, aliado à intensificação das atividades de urbanização e infraestrutura, tem ampliado significativamente a geração de resíduos da construção civil em diversos países. Nesse sentido, pesquisadores apontam que a expansão do setor construtivo, embora essencial para o desenvolvimento econômico e urbano, também representa um desafio relevante para a gestão ambiental contemporânea (Nascimento *et al.*, 2022).

A partir dessa perspectiva, torna-se evidente que a caracterização dos resíduos da construção civil não se limita à simples identificação de seus componentes. Ao contrário, envolve a análise de fatores estruturais relacionados à dinâmica produtiva do setor, incluindo práticas construtivas, padrões de consumo de materiais e modelos de planejamento de obras. Tal abordagem permite compreender de maneira mais abrangente as razões que explicam o elevado volume de resíduos gerados nas atividades construtivas (Rodrigues, 2022).

O descarte inadequado desses materiais pode provocar degradação do solo, contaminação de recursos hídricos e ocupação irregular de áreas urbanas, além de comprometer a qualidade ambiental das cidades. Dessa forma, compreender a natureza desses resíduos constitui etapa essencial para o desenvolvimento de estratégias voltadas à mitigação desses impactos (Sousa *et al.*, 2021).

Em complemento a essas discussões, diversos estudos ressaltam que a caracterização detalhada dos resíduos da construção civil também desempenha papel estratégico na formulação de políticas públicas e diretrizes normativas voltadas ao setor. Ao identificar os tipos de resíduos mais recorrentes e suas principais fontes de geração, torna-se possível estabelecer medidas regulatórias mais eficazes para promover práticas de gerenciamento ambientalmente responsáveis. Assim, o conhecimento científico produzido sobre o tema contribui para subsidiar decisões técnicas e institucionais relacionadas ao manejo desses materiais (Andrade *et al.*, 2021).

Diante desse conjunto de reflexões, a literatura evidencia que o estudo dos resíduos gerados pela construção civil representa um campo de investigação fundamental para a promoção de práticas mais sustentáveis no setor construtivo. A caracterização desses materiais, aliada à compreensão de seus impactos e de suas formas de geração, permite consolidar bases teóricas importantes para o desenvolvimento de modelos de gestão mais eficientes (Nascimento *et al.*, 2022).

A gestão dos resíduos provenientes da construção civil tem se consolidado como tema central nas discussões sobre sustentabilidade no setor construtivo, especialmente diante do crescimento urbano e da intensificação das atividades edificatórias. Nesse contexto, a literatura científica tem ressaltado que o gerenciamento adequado desses materiais depende da implementação de sistemas organizados que contemplem etapas como segregação, armazenamento, transporte e destinação final. A ausência de planejamento nessas etapas tende a ampliar os impactos ambientais e dificultar a adoção de práticas mais sustentáveis no setor, reforçando a necessidade de modelos de gestão mais estruturados e eficientes (Leão *et al.*, 2024).

Por sua vez, estudos recentes indicam que a adoção de práticas de gerenciamento ambientalmente responsáveis pode contribuir para a redução do desperdício de materiais, além de favorecer o reaproveitamento de insumos que, de outra forma, seriam descartados. Dessa maneira, o manejo adequado desses resíduos passa a ser compreendido como parte integrante das estratégias voltadas à sustentabilidade na construção civil (Silva *et al.*, 2024).

Sob outra perspectiva, parte da literatura tem enfatizado a importância da incorporação de ferramentas tecnológicas e sistemas de informação no gerenciamento de resíduos da construção civil. O desenvolvimento de plataformas digitais voltadas ao controle e monitoramento da geração de resíduos tem sido apontado como estratégia capaz de otimizar processos logísticos e facilitar a rastreabilidade desses materiais. Tais iniciativas contribuem para ampliar a eficiência das práticas de gestão e para fortalecer a integração entre diferentes agentes envolvidos nas atividades construtivas (Neto *et al.*, 2021).

Adicionalmente, o manejo adequado desses resíduos também envolve a adoção de práticas que favoreçam a reutilização e a reciclagem de materiais provenientes das atividades construtivas. Nesse sentido, a literatura destaca que diversos resíduos podem ser reaproveitados como agregados reciclados na produção de novos materiais de construção, reduzindo a extração de recursos naturais e minimizando o volume destinado a aterros. Esse processo tem sido considerado uma alternativa relevante para promover maior eficiência no uso de recursos dentro do setor construtivo (Resende *et al.*, 2024).

A discussão acadêmica também tem incorporado o conceito de economia

circular como abordagem promissora para o gerenciamento de resíduos da construção civil. A partir dessa perspectiva, busca-se substituir modelos lineares de produção e descarte por sistemas nos quais os materiais permanecem em ciclos contínuos de reaproveitamento. Tal abordagem permite transformar resíduos em novos recursos produtivos, promovendo maior eficiência no uso de materiais e contribuindo para reduzir os impactos ambientais associados às atividades construtivas (Lara *et al.*, 2021).

Sendo assim, a literatura destaca que a efetividade das práticas de gestão e manejo de resíduos depende da articulação entre políticas públicas, regulamentações ambientais e iniciativas do setor produtivo. A implementação de diretrizes normativas e instrumentos de gestão ambiental tem sido considerada fundamental para orientar o setor da construção civil na adoção de práticas mais responsáveis. Assim, a consolidação de modelos eficientes de gerenciamento de resíduos passa a ser entendida como elemento essencial para o avanço da sustentabilidade no contexto da construção civil contemporânea (Nascimento *et al.*, 2022).

A discussão acerca da sustentabilidade na construção civil tem adquirido crescente centralidade na literatura científica contemporânea, sobretudo diante dos desafios ambientais associados ao modelo tradicional de produção e consumo de materiais no setor. A elevada demanda por recursos naturais, aliada ao volume expressivo de resíduos gerados pelas atividades construtivas, evidencia a necessidade de repensar práticas produtivas historicamente baseadas em um sistema linear de extração, utilização e descarte. Nesse cenário, a sustentabilidade passa a ser compreendida como princípio estruturante para a reorganização das atividades construtivas, orientando novas formas de gestão de materiais e de redução de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações (Rodrigues, 2022).

Inserida nesse debate, a economia circular tem emergido como abordagem teórica capaz de oferecer alternativas concretas para a transformação dos modelos produtivos da construção civil. Dessa forma, resíduos anteriormente considerados descartáveis passam a ser interpretados como potenciais insumos para novas cadeias produtivas, contribuindo para a racionalização do uso de recursos naturais e para a diminuição dos impactos ambientais do setor construtivo (Lara *et al.*, 2021).

A incorporação desses princípios ao contexto da construção civil também tem sido associada à necessidade de ampliar o entendimento sobre os impactos ambientais decorrentes das atividades edificatórias. Nesse sentido, estudos indicam que a geração de resíduos sólidos provenientes da construção e demolição representa um dos principais desafios para a sustentabilidade urbana contemporânea. A análise desses impactos evidencia que práticas inadequadas de descarte e gerenciamento de resíduos podem comprometer a qualidade ambiental das cidades, reforçando a importância de estratégias que priorizem a redução, reutilização e reciclagem desses materiais (Andrade *et al.*, 2021).

De tal forma, diferentes pesquisas têm enfatizado que a transição para modelos mais sustentáveis na construção civil depende da adoção de estratégias integradas de gestão de resíduos e de otimização do uso de materiais. A implementação de práticas voltadas ao reaproveitamento de insumos construtivos, bem como a incorporação de tecnologias que favoreçam a reciclagem de resíduos, constitui elemento fundamental para consolidar processos produtivos mais

eficientes do ponto de vista ambiental. Assim, a sustentabilidade no setor construtivo passa a ser compreendida como resultado da articulação entre inovação tecnológica, planejamento ambiental e responsabilidade socioambiental (Silva *et al.*, 2024).

Um assunto frequentemente destacado na literatura refere-se ao papel do gerenciamento de resíduos sólidos como instrumento estratégico para a promoção da sustentabilidade na construção civil. A organização adequada das etapas de segregação, coleta e destinação final desses materiais permite reduzir significativamente os impactos ambientais associados às atividades construtivas. Além disso, a gestão eficiente dos resíduos possibilita ampliar o aproveitamento de materiais recicláveis, contribuindo para a consolidação de práticas mais responsáveis e alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável (Sousa *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a economia circular apresenta-se como abordagem capaz de ampliar as possibilidades de reaproveitamento de materiais e de promover maior eficiência no uso de recursos naturais. Ao incentivar a reinserção de resíduos nos ciclos produtivos, esse modelo contribui para transformar materiais anteriormente descartados em novos insumos para o setor da construção civil. Tal perspectiva favorece a redução da extração de matérias-primas e fortalece estratégias voltadas ao uso mais racional dos recursos disponíveis (Lara *et al.*, 2021).

Em complemento a essas discussões, diversos estudos têm ressaltado o potencial da reutilização de resíduos de construção e demolição na produção de novos materiais, especialmente no contexto da fabricação de agregados reciclados para o concreto. Essa prática representa alternativa relevante para reduzir a extração de matérias-primas naturais e para ampliar a eficiência no uso de recursos dentro do setor construtivo. Dessa maneira, a valorização desses resíduos como insumos produtivos reforça os fundamentos da economia circular e contribui para a construção de modelos mais sustentáveis de produção na construção civil (Resende *et al.*, 2024).

3 CONCLUSÃO

A presente revisão de literatura tem como foco discutir a gestão de resíduos da construção civil, considerando suas características, formas de manejo e sua relação com práticas sustentáveis no setor construtivo. A partir da análise da produção científica recente, observa-se que o objetivo geral do estudo é alcançado, uma vez que a literatura examinada permite compreender de maneira consistente os principais aspectos relacionados à geração de resíduos, às estratégias de gerenciamento e às abordagens voltadas à sustentabilidade no contexto da construção civil. Ao longo da discussão, evidencia-se que o setor construtivo ocupa papel relevante na produção de resíduos sólidos, o que reforça a necessidade de aprofundar o debate acadêmico sobre formas mais eficientes de gestão desses materiais.

Em relação ao problema de pesquisa, a revisão demonstra que a literatura científica apresenta diferentes perspectivas sobre a gestão de resíduos da construção civil, destacando tanto os desafios quanto as possibilidades existentes para promover práticas mais sustentáveis no setor. Os estudos analisados indicam que o gerenciamento adequado desses resíduos envolve processos orga-

nizados de segregação, destinação e reaproveitamento de materiais, além da incorporação de princípios associados à sustentabilidade e à economia circular. Dessa forma, a produção acadêmica aponta que a adoção de estratégias voltadas ao reaproveitamento de resíduos e à racionalização do uso de recursos naturais constitui elemento fundamental para reduzir impactos ambientais e fortalecer modelos construtivos mais responsáveis.

Apesar das contribuições identificadas na literatura, algumas limitações são observadas ao longo do estudo, especialmente no que se refere à diversidade de abordagens metodológicas presentes nas pesquisas analisadas e à concentração de determinados estudos em contextos específicos. Tais fatores podem limitar a generalização de algumas discussões para diferentes realidades regionais ou produtivas. Diante desse cenário, recomenda-se que pesquisas futuras ampliem a investigação sobre práticas de gestão sustentável de resíduos na construção civil, considerando diferentes contextos urbanos, avanços tecnológicos e modelos produtivos emergentes.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Elysson Marcks Gonçalves de. *et al.* Impacto ambiental e gerenciamento de resíduos sólidos advindos da construção civil no Brasil: uma revisão de literatura. **ID Online Revista de Psicologia**, v. 15, n. 55, 2021. Disponível em: <https://idonline.emnuvens.com.br/id/article/view/3108>. Acesso em: 15 jun. 2026.

LARA, Beatriz Leão Evangelista de. *et al.* Economia circular aplicada aos resíduos da construção civil: revisão de literatura. **Repositório Institucional da Universidade Federal de Santa Catarina**, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/227770>. Acesso em: 15 jun. 2026.

LEAL, Ailton Pires. Resíduos da construção civil: uma revisão sobre as possibilidades de aplicação. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 6, 2021. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/1385>. Acesso em: 15 jun. 2026.

LEÃO, Úrsula Maíra Maciel Rigon. *et al.* O cenário do gerenciamento de resíduos da construção civil no Brasil. **Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2024. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/5915>. Acesso em: 15 jun. 2026.

MEIRELES, Jefferson Rodrigues. Revisão da literatura sobre reciclagem de resíduos sólidos da construção civil em parâmetro mundial. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)** – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/4472>. Acesso em: 15 jun. 2026.

NASCIMENTO, Emilli Rodrigues do. *et al.* Sustainability in civil construction in Brazil: a review of the literature. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, 2022. Disponível em: <https://rsd-journal.org/index.php/rsd/article/view/36611>. Acesso em: 15 jun. 2026.

NETO, João Felix Barreto. *et al.* Plataforma de gestão de resíduos para o fomento da economia circular na construção civil. **Anais do Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção**, 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sibragec/article/view/450>. Acesso em: 15 jun. 2026.

RESENDE, Heron Freitas. *et al.* Uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto: uma breve revisão de literatura. **Revista Principia**, v. 61, n. 3, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/7086>. Acesso em: 15 jun. 2026.

RODRIGUES, Antonio Rony da Silva Pereira. Sustentabilidade aplicada à construção civil: uma revisão de literatura. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 4, 2022. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/12472. Acesso em: 15 jun. 2026.

SILVA, Sabrina de Fátima da. *et al.* Avanços na gestão e sustentabilidade dos resíduos da construção civil: uma revisão bibliométrica e bibliográfica. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 13,

n. 2, 2024. Disponível em: <https://journalppc.com/RPPC/article/view/1473>. Acesso em: 15 jun. 2026.

SOUSA, Elida Ferreira de. *et al.* Sustentabilidade na construção pelo gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. **Revista Mangaio Acadêmico**, v. 6, n. 1, 2021. Disponível em: <https://estacio.periodicoscientificos.com.br/index.php/mangaio/article/view/1550>. Acesso em: 15 jun. 2026.



Capítulo 15

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE USINAGEM NO ACABAMENTO SUPERFICIAL: ÊNFASE A AÇOS CARBONO PROCESSADOS POR TORNEAMENTO

INFLUENCE OF MACHINING PARAMETERS ON SURFACE FINISH: EMPHASIS ON CARBON STEELS PROCESSED BY TURNING

José Cleuton Pereira da Silva¹

Ronaldo de Jesus Barros²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A usinagem por torneamento desempenha papel fundamental na fabricação de componentes mecânicos, especialmente na produção de peças em aços carbono que exigem precisão dimensional e adequado acabamento superficial. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar teoricamente a influência dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de aços carbono processados por torneamento, com ênfase na velocidade de corte, avanço da ferramenta e profundidade de corte. A pesquisa caracterizou-se como qualitativa, descritiva e de natureza bibliográfica, sendo desenvolvida a partir da análise de livros, artigos científicos, dissertações e teses publicados em bases acadêmicas nacionais e internacionais. Os resultados discutidos evidenciaram que os parâmetros de corte influenciam diretamente a rugosidade superficial, as condições térmicas do processo, os esforços de usinagem e a estabilidade dinâmica durante o torneamento. Observou-se ainda que a combinação inadequada desses parâmetros pode comprometer a integridade superficial e a qualidade funcional das peças usinadas. Conclui-se que o controle adequado das condições de usinagem é essencial para otimizar a produtividade e garantir melhores características superficiais em componentes fabricados em aços carbono. Além disso, o estudo contribui para ampliar o entendimento teórico acerca das relações entre parâmetros de corte e acabamento superficial em processos de torneamento.

Palavras-chave: Acabamento superficial. Usinagem por torneamento. Parâmetros de usinagem. Aços carbono. Rugosidade superficial.

Abstract

Turning machining plays a fundamental role in the manufacture of mechanical components, especially in the production of carbon steel parts that require dimensional accuracy and adequate surface finish. In this context, the present study aimed to theoretically analyze the influence of machining parameters on the surface finish of carbon steels processed by turning, with emphasis on cutting speed, feed rate, and depth of cut. The research is characterized as qualitative, descriptive, and bibliographic in nature, being developed through the analysis of books, scientific articles, dissertations, and theses published in national and international academic databases. The discussed results showed that cutting parameters directly influence surface roughness, thermal conditions of the process, machining forces, and dynamic stability during turning operations. It was also observed that an inadequate combination of these parameters may compromise surface integrity and the functional quality of machined parts. It is concluded that proper control of machining conditions is essential to optimize productivity and ensure improved surface characteristics in components manufactured from carbon steels. Furthermore, the study contributes to expanding the theoretical understanding of the relationships between cutting parameters and surface finish in turning processes.

Keywords: Surface finish. Turning machining. Machining parameters. Carbon steels. Surface roughness.

1 INTRODUÇÃO

A usinagem constitui um dos principais processos de fabricação utilizados na produção de componentes mecânicos e estruturais na indústria moderna. Entre os diversos métodos existentes, o torneamento destaca-se por sua ampla aplicação na obtenção de peças com elevada precisão dimensional e características superficiais específicas. Nesse contexto, o acabamento superficial assume papel fundamental, pois influencia diretamente propriedades funcionais dos componentes, como resistência ao desgaste, comportamento em condições de atrito, desempenho em fadiga e confiabilidade estrutural.

Os aços carbono figuram entre os materiais mais utilizados na fabricação de peças industriais devido à sua versatilidade, resistência mecânica e custo relativamente acessível. Durante o processo de torneamento desses materiais, diversos parâmetros de usinagem interferem diretamente no resultado obtido na superfície da peça. Entre esses parâmetros, destacam-se a velocidade de corte, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte, que exercem influência significativa na formação da superfície usinada e, conseqüentemente, na qualidade do acabamento superficial.

Apesar da ampla utilização do processo de torneamento na indústria, ainda existem desafios relacionados à compreensão detalhada das interações entre os parâmetros de usinagem e o comportamento do material durante o processo de remoção de cavaco. A variação desses parâmetros pode gerar diferentes condições de contato entre ferramenta e peça, alterar os esforços de corte e modificar a estabilidade do processo, fatores que podem afetar diretamente a rugosidade superficial e a integridade da superfície usinada.

Diante desse cenário, surge a seguinte problemática de pesquisa: como os parâmetros de usinagem, especialmente velocidade de corte, avanço da ferramenta e profundidade de corte, influenciam de forma específica e inter-relacionada o acabamento superficial de aços carbono processados por torneamento? A investigação dessa questão torna-se relevante tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico, uma vez que a compreensão dessas relações pode contribuir para o aprimoramento das práticas de usinagem utilizadas na indústria.

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo geral analisar teoricamente a influência dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de aços carbono usinados por torneamento, buscando contribuir para a compreensão das relações entre as variáveis do processo e a qualidade da superfície obtida. Para alcançar esse propósito, foram definidos como objetivos específicos investigar teoricamente a relação entre a velocidade de corte e o acabamento superficial, avaliar como o avanço da ferramenta pode impactar a rugosidade e outras características superficiais, e analisar a influência da profundidade de corte nas propriedades do acabamento superficial em componentes fabricados a partir de aços carbono.

A relevância deste estudo está associada à possibilidade de ampliar o entendimento teórico sobre os fatores que influenciam o acabamento superficial em processos de torneamento, contribuindo para o desenvolvimento de práticas de usinagem mais eficientes. Além disso, os resultados dessa investigação podem fornecer subsídios importantes para a otimização de processos industriais que utilizam aços carbono, favorecendo a melhoria da qualidade dos componentes produzidos e o aumento da eficiência produtiva em diferentes setores da indústria.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O presente estudo foi desenvolvido por meio de uma pesquisa de natureza qualitativa, de caráter descritivo, utilizando como procedimento metodológico a revisão bibliográfica. Essa abordagem foi adotada devido à natureza teórica da pesquisa, que buscou reunir e analisar conhecimentos disponíveis na literatura científica acerca da influência dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de aços carbono submetidos ao processo de torneamento.

A coleta de informações foi realizada por meio da consulta a livros, dissertações, teses e artigos científicos disponíveis em bases de dados acadêmicas, com destaque para SciELO, ScienceDirect, Google Acadêmico e o Portal de Periódicos CAPES. Foram priorizados trabalhos publicados nos últimos dez anos (2016-2026), de modo a contemplar produções científicas recentes e relevantes para o tema investigado.

As buscas foram realizadas a partir de descritores relacionados ao tema da pesquisa, entre os quais se destacam “acabamento superficial”, “usinagem por torneamento”, “parâmetros de usinagem” e “aços carbono”, além de seus correspondentes em inglês, como “*surface roughness*”, “*turning process*” e “*cutting parameters*”. Como critérios de inclusão foram considerados artigos, dissertações, teses e livros publicados em português ou inglês que apresentassem relação direta com o tema estudado. Foram excluídos trabalhos sem pertinência com o objeto da pesquisa, bem como resumos simples ou textos sem revisão científica.

2.2 Resultados e Discussão

O aço desempenha um papel crucial na economia, impulsionando diversas cadeias produtivas devido à sua aplicação nos setores automobilístico, industrial e civil. Um dos métodos de beneficiamento do aço é a usinagem, um processo de fabricação que envolve a remoção de material de uma peça original para obter a forma desejada. Isso requer o uso de equipamentos especializados para cortar o material e remover os cavacos, dando à peça o formato necessário para sua finalidade específica (Naitzke *et al.*, 2019).

Na usinagem, ferramentas de geometria definida são usadas em operações como torner, fresar e furar, enquanto ferramentas de geometria não definida são utilizadas para retificar, lixar, polir e lapidar. O torneamento, especificamente, é empregado para dar forma cilíndrica a metais. Durante esse processo, o material é fixado em um torno, que o faz girar para possibilitar sua modelagem ou corte através de ferramentas manuais ou dispositivos especiais. Dentre os parâmetros de corte no torneamento, destacam-se a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte, os quais influenciam diretamente na eficiência e na qualidade da operação (Kikukawa *et al.*, 2019).

O torneamento é um processo de usinagem que visa produzir superfícies cilíndricas através da rotação da peça em torno do eixo principal da máquina, enquanto uma ou mais ferramentas de corte realizam movimentos precisos. Durante a operação, a ferramenta é posicionada em relação à peça para garantir um contato adequado e eficiente. A profundidade de corte é ajustada de acordo

com as especificações do projeto, e a velocidade de avanço da ferramenta é controlada para obter o acabamento desejado (Uemura; Peres; Zanghettin, 2017).

A Figura 1 apresenta os movimentos fundamentais aplicados no torneamento externo de uma peça: a rotação da peça, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte. A rotação da peça assegura a uniformidade na remoção de material, enquanto o avanço controlado da ferramenta determina a taxa de remoção e o acabamento superficial (Kikukawa *et al.*, 2019).

A precisão e o rigor na finalização estética de qualquer componente mecânico são essenciais para assegurar seu desempenho conforme o previsto. As superfícies usinadas inevitavelmente apresentam irregularidades em relação ao padrão teórico, impossibilitando a perfeição absoluta. Dessa forma, torna-se necessário monitorar o acabamento superficial por meio de instrumentos de medição adequados, como os rugosímetros (Guedes, 2014).

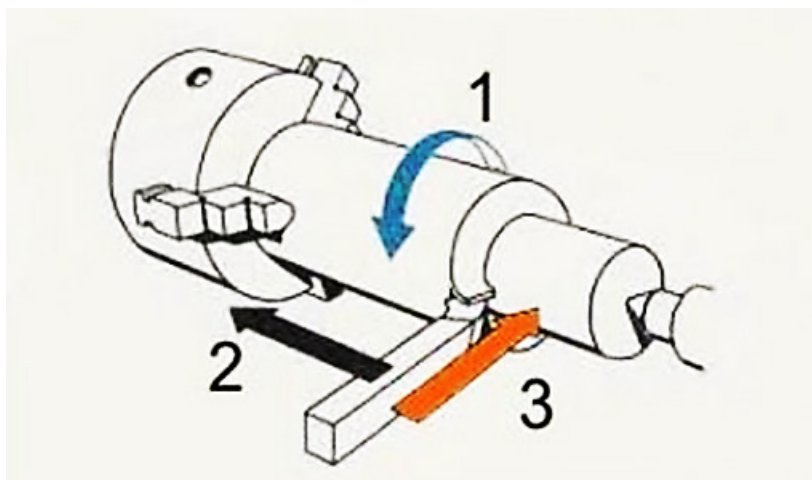


Figura 1. Esquema de movimentos simultâneos na usinagem por torneamento

Fonte: Kikukawa *et al.* (2019, p. 99)

A literatura recente também tem ampliado a análise da influência da velocidade de corte para além da rugosidade média tradicional, incorporando parâmetros mais complexos de caracterização da superfície usinada. Nesse contexto, estudos recentes têm utilizado parâmetros tridimensionais de textura superficial para avaliar de forma mais detalhada a topografia gerada durante o processo de torneamento. Segundo Molnar (2023), a análise tridimensional da superfície permite compreender melhor a distribuição espacial das irregularidades produzidas pelo processo de usinagem, possibilitando avaliar com maior precisão o desempenho funcional da superfície em aplicações industriais.

Outro aspecto investigado em pesquisas recentes refere-se à relação entre velocidade de corte e integridade superficial do material usinado. De acordo com Szablewski *et al.* (2023), além da rugosidade, parâmetros como tensões residuais e alterações microestruturais na camada superficial podem ser influenciados pelas condições de corte adotadas. Os autores destacam que velocidades de corte inadequadas podem gerar níveis elevados de tensões residuais, afetando propriedades mecânicas importantes, como resistência à fadiga e durabilidade de componentes submetidos a esforços cíclicos.

Além disso, investigações conduzidas por Agari *et al.* (2024) indicam que a velocidade de corte pode influenciar diretamente a estabilidade térmica do processo de usinagem, afetando a distribuição de temperatura na zona de corte

e, conseqüentemente, a qualidade da superfície obtida. Segundo os autores, o controle adequado desse parâmetro contribui para minimizar efeitos indesejáveis relacionados ao desgaste prematuro da ferramenta e à deterioração da superfície usinada.

Estudos recentes demonstram que a variação dos parâmetros de corte exerce influência significativa na qualidade da superfície produzida durante o torneamento. Alterações na velocidade de corte podem modificar a topografia da superfície usinada e suas propriedades tribológicas, afetando diretamente parâmetros de rugosidade e o comportamento funcional da peça (Kónya *et al.*, 2024).

Além disso, análises estatísticas aplicadas ao processo de usinagem indicam que a combinação adequada entre velocidade de corte, avanço e profundidade de corte é fundamental para otimizar simultaneamente produtividade e acabamento superficial em operações de torneamento (Reffas *et al.*, 2025).

O processo de torneamento é caracterizado pela conjugação de dois movimentos essenciais: a rotação da peça e o avanço controlado da ferramenta de corte. Durante o torneamento, a peça é girada em torno de seu eixo principal, enquanto a ferramenta de corte se move de forma precisa em direção à superfície da peça. O movimento de avanço da ferramenta pode ocorrer ao longo do comprimento da peça, resultando na redução do diâmetro da peça para um tamanho menor (Naitzke *et al.*, 2019).

Esse processo de usinagem é crucial para a obtenção de peças com dimensões precisas e acabamento superficial adequado, demandando controle metódico dos parâmetros de corte para garantir a qualidade do produto. O avanço da ferramenta influencia diretamente a formação da superfície usinada, pois determina a distância entre as marcas deixadas pela passagem sucessiva da ferramenta (Naitzke *et al.*, 2019).

O acabamento superficial é primariamente determinado pela rugosidade, que consiste em uma série de imperfeições, com espaçamento regular ou irregular, que formam um padrão ou textura distintivos em uma superfície. Essas imperfeições são inerentes a todas as superfícies reais e frequentemente refletem o método de fabricação utilizado, como torneamento, fresamento ou outros processos de usinagem (Kikukawa *et al.*, 2019).

Pesquisas recentes têm ampliado a análise da influência do avanço da ferramenta para além da descrição geométrica das marcas deixadas na superfície usinada, incorporando métodos estatísticos e modelos preditivos capazes de estimar parâmetros de rugosidade em diferentes condições de usinagem. Nesse contexto, Reffas *et al.* (2025) aplicaram técnicas de modelagem estatística para avaliar o comportamento dos parâmetros de corte em operações de torneamento, demonstrando que o avanço da ferramenta apresenta elevada correlação com parâmetros de rugosidade média e máxima da superfície usinada. Segundo os autores, a análise estatística permite identificar combinações de parâmetros capazes de melhorar simultaneamente a qualidade superficial e a eficiência do processo.

Outra abordagem recente envolve a caracterização tridimensional da topografia superficial gerada durante o torneamento. Molnar (2023) destaca que parâmetros tridimensionais de textura superficial, como S_a e S_z , possibilitam uma análise mais detalhada das irregularidades produzidas durante a usinagem. De acordo com o autor, variações no avanço da ferramenta podem alterar significa-

tivamente a distribuição espacial dessas irregularidades, influenciando o comportamento funcional da superfície em aplicações que envolvem contato mecânico ou lubrificação.

Além disso, investigações recentes indicam que o avanço da ferramenta pode influenciar as forças de corte e a estabilidade do processo de usinagem. Estudos conduzidos por Kónya *et al.* (2024) demonstram que o aumento do avanço tende a elevar as forças atuantes na ferramenta e a intensificar fenômenos vibratórios durante o torneamento. Esses fatores podem afetar a integridade da superfície usinada e comprometer a qualidade do acabamento, evidenciando a importância da seleção adequada desse parâmetro nas operações de usinagem.

Um dos aspectos críticos na produção de peças é o acabamento superficial, especialmente considerando os elevados padrões de precisão exigidos em diversos setores industriais. O acabamento superficial desempenha um papel fundamental em aplicações sujeitas a atrito, desgaste, transferência de calor, resistência à fadiga, corrosão e medições dimensionais precisas (Nogueira, 2022).

A avaliação do acabamento superficial é realizada por meio da medição da rugosidade, que corresponde ao conjunto de irregularidades presentes na superfície das peças usinadas. Essas irregularidades são influenciadas por diversos fatores do processo de fabricação, incluindo os parâmetros de corte adotados durante a usinagem (Nogueira, 2022).

Hübner (2016) destaca que a rugosidade superficial pode ser especificada de acordo com a aplicação da superfície usinada, sendo relevante em contextos como superfícies destinadas à pintura, mancais e escoamento de fluidos. Em superfícies que operam em contato ou sob carga cíclica, níveis elevados de rugosidade podem reduzir a resistência à fadiga e aumentar o desgaste.

A rugosidade pode influenciar aspectos como resistência à fadiga, desgaste, corrosão, escoamento de fluidos e capacidade de deslizamento em componentes mecânicos. Esses fatores são impactados por diferentes variáveis do processo de usinagem, entre elas a profundidade de corte, que pode alterar os esforços de corte e a estabilidade do processo (Colaco; Medeiros, 2014). A Figura 2 apresenta um diagrama de Ishikawa que ilustra os diferentes fatores que podem influenciar a rugosidade superficial em processos de usinagem.

Estudos recentes indicam que a profundidade de corte exerce influência significativa não apenas na taxa de remoção de material, mas também na integridade da superfície resultante. Reffas *et al.* (2025) destacam que o aumento desse parâmetro tende a elevar as forças de usinagem e as tensões geradas na zona de corte, podendo ocasionar alterações na textura superficial e na estabilidade do processo. Segundo os autores, níveis elevados de profundidade de corte podem intensificar a geração de vibrações e favorecer irregularidades no perfil superficial das peças usinadas.

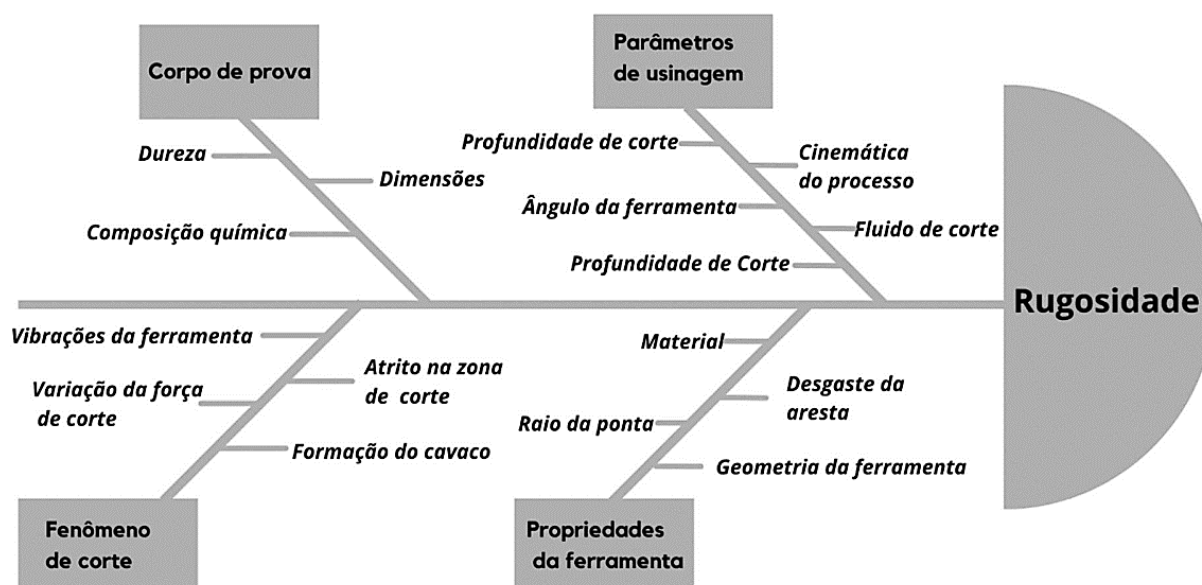


Figura 2. Aspectos que impactam a rugosidade

Fonte: Nogueira (2022)

Outro aspecto relevante refere-se à relação entre profundidade de corte e geração de energia durante o processo de torneamento. Karmiris-Obratanski et al. (2024) ressaltam que variações nos parâmetros de corte, incluindo a profundidade de corte, podem alterar significativamente as condições térmicas e mecânicas na zona de usinagem, influenciando a formação da superfície e o comportamento do material durante o processo de remoção de cavaco.

Além disso, investigações recentes apontam que a profundidade de corte pode afetar diretamente a estabilidade dinâmica do processo de usinagem. Denkena e Biermann (2014) destacam que variações nesse parâmetro modificam as condições de contato entre ferramenta e peça, podendo favorecer fenômenos de vibração regenerativa durante o torneamento. Essas vibrações influenciam a qualidade superficial obtida, contribuindo para a formação de irregularidades no perfil de rugosidade e possíveis desvios dimensionais.

Dessa forma, a seleção adequada da profundidade de corte torna-se fundamental para o equilíbrio entre produtividade e qualidade superficial, especialmente em operações de torneamento de aços carbono. A literatura recente demonstra que a otimização desse parâmetro deve considerar não apenas a taxa de remoção de material, mas também os efeitos sobre forças de corte, geração de calor e estabilidade do processo.

3 CONCLUSÃO

O presente estudo possibilitou compreender, por meio da revisão bibliográfica, a influência dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de aços carbono processados por torneamento. A análise teórica realizada ao longo do trabalho permitiu verificar que variáveis como velocidade de corte, avanço da ferramenta e profundidade de corte exercem influência direta sobre a rugosidade e a integridade superficial das peças usinadas. Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa foi alcançado, uma vez que foi possível discutir e relacionar os principais fatores envolvidos na qualidade superficial obtida durante o processo

de torneamento. Além disso, os objetivos específicos também foram atendidos ao investigar separadamente os efeitos de cada parâmetro de usinagem sobre o acabamento superficial.

Em relação à problemática proposta, conclui-se que os parâmetros de usinagem atuam de maneira inter-relacionada no comportamento do processo de corte e nas características finais da superfície usinada. Observou-se que alterações na velocidade de corte podem modificar as condições térmicas e tribológicas da operação, enquanto o avanço da ferramenta influencia diretamente a formação geométrica da rugosidade superficial. Da mesma forma, a profundidade de corte interfere nos esforços de usinagem, na estabilidade dinâmica do processo e na geração de vibrações, fatores que podem comprometer a qualidade superficial das peças. Assim, a adequada seleção e combinação desses parâmetros torna-se essencial para alcançar melhores condições de acabamento e maior eficiência produtiva nos processos industriais de torneamento.

Como limitações do estudo, destaca-se o fato de a pesquisa possuir caráter exclusivamente bibliográfico, não envolvendo análises experimentais ou medições práticas em laboratório. Dessa maneira, as discussões desenvolvidas basearam-se em resultados já publicados na literatura científica, o que restringe a obtenção de dados específicos para determinadas condições de usinagem e materiais. Ainda assim, o estudo contribui para ampliar o entendimento teórico sobre o tema e fornecer subsídios para futuras investigações. Recomenda-se que trabalhos futuros realizem análises experimentais envolvendo diferentes classes de aços carbono, ferramentas de corte e condições operacionais, além da utilização de métodos computacionais e técnicas de monitoramento em tempo real para otimização dos parâmetros de usinagem e melhoria do acabamento superficial.

REFERÊNCIAS

- AGARI, S. R. *et al.* Improvement in the machining processes by micro-textured tools during the turning process. **Engineering Proceedings**, v. 61, n. 1, p. 2, 2024.
- COLACO, G. A.; MEDEIROS, I. D. M. Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade no torneamento cilíndrico externo em corte a seco e com abundância de fluido de corte. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 34., 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABEPRO, 2014.
- DENKANA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP annals**, v. 63, n. 2, p. 631-653, 2014.
- GUEDES, David Esteves. **Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- HÜBNER, Henrique Butzlaff. **Estimação da rugosidade gerada no processo de fresamento frontal via redes neurais artificiais**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- KARMIRIS-OBROTANSKI, P. *et al.* Advanced Machining Technology for Modern Engineering Materials. **Materials**, v. 17, n. 9, p. 2064, 2024.
- KIKUKAWA, J. K. *et al.* Análise do processo de torneamento em relação a rugosidade superficial do aço SAE 1010. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 4, n. 2, 2019.
- KÓNYA, G. *et al.* The effects of cutting parameters on cutting force and tribological properties of machined surface under dry turning of AISI304L austenitic stainless steel. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 8, n. 6, p. 257, 2024.

- MOLNAR, Viktor. Influence of cutting parameters and tool geometry on topography of hard turned surfaces. **Machines**, v. 11, n. 6, p. 665, 2023.
- NAITZKE, D. A. C. *et al.* Análise da rugosidade superficial do aço sae1020 no processo de torneamento. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 4, n. 2, 2019.
- NOGUEIRA, Patric de Holanda. **Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre o acabamento superficial dos corpos de provas impressos com filamento ABS**. 2022. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.
- REFFAS, O. *et al.* Statistical analysis and predictive modeling of cutting parameters in EN-GJL-250 cast iron turning: application of machine learning and MOALO optimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 137, n. 3, p. 1991-2009, 2025.
- SZABLEWSKI, P. *et al.* Surface topography description after turning Inconel 718 with a conventional, wiper and special insert made by the SPS technique. **Materials**, v. 16, n. 3, p. 949, 2023.
- UEMURA, L. C.; PERES, F. B.; ZANGHETTIN, L. Energia mecânica com ênfase em processos de usinagem–torneamento. **REGRAD – Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM**, v. 10, n. 01, p. 325-338, 2017.



Capítulo 16

ANÁLISE DO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS NA EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM

ANALYSIS OF CHIP RECOVERY IN THE EVOLUTION OF MACHINING PROCESSES

Eduardo Nunes Macedo¹

Thiago Santana de Oliveira²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A evolução da usinagem industrial tem sido impulsionada pelo avanço das tecnologias de automação e pela aplicação de sistemas de Controle Numérico Computadorizado (CNC), os quais têm contribuído significativamente para o aumento da precisão, produtividade e qualidade nos processos de fabricação. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar os impactos das tecnologias CNC e do reaproveitamento de cavacos metálicos na indústria moderna, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais associados à manufatura contemporânea. A metodologia adotada consiste em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo, desenvolvida a partir da análise de livros, artigos científicos e publicações acadêmicas relacionadas às áreas de usinagem, automação industrial, fluidos de corte e sustentabilidade. Essa abordagem permitiu a consolidação de diferentes perspectivas teóricas sobre a modernização dos processos produtivos e a gestão de resíduos metálicos. Os resultados obtidos evidenciam que a utilização de máquinas CNC promove melhorias expressivas no controle dos processos de usinagem, reduzindo falhas humanas, elevando a qualidade do acabamento superficial e aumentando a eficiência produtiva. Além disso, constatou-se que o reaproveitamento de cavacos metálicos, aliado à gestão adequada de resíduos industriais, contribui para a redução de custos operacionais e para a adoção de práticas mais sustentáveis no ambiente industrial. Conclui-se que a integração entre automação, qualidade produtiva e sustentabilidade é fundamental para o fortalecimento da competitividade industrial no contexto da Indústria 4.0, representando um fator estratégico para a evolução dos processos de usinagem na manufatura moderna.

Palavras-chave: Usinagem CNC. Automação industrial. Cavacos metálicos. Sustentabilidade industrial.

Abstract

The evolution of industrial machining has been driven by advances in automation technologies and the application of Computer Numerical Control (CNC) systems, which have significantly contributed to increased precision, productivity, and quality in manufacturing processes. In this context, this study aims to analyze the impacts of CNC technologies and the reuse of metal chips in modern industry, considering technical, economic, and environmental aspects associated with contemporary manufacturing. The methodology adopted consists of a qualitative and descriptive literature review, developed from the analysis of books, scientific articles, and academic publications related to the areas of machining, industrial automation, cutting fluids, and sustainability. This approach allowed for the consolidation of different theoretical perspectives on the modernization of production processes and the management of metallic waste. The results obtained show that the use of CNC machines promotes significant improvements in the control of machining processes, reducing human error, improving surface finish quality, and increasing production efficiency. Furthermore, it was found that the reuse of metal chips, combined with proper management of industrial waste, contributes to the reduction of operating costs and the adoption of more sustainable practices in the industrial environment. It is concluded that the integration between automation, production quality and sustainability is fundamental to strengthening industrial competitiveness in the context of Industry 4.0, representing a strategic factor for the evolution of machining processes.

ses in modern manufacturing.

Keywords: CNC machining. Industrial automation. Metal chips. Industrial sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A modernização dos processos industriais tem impulsionado mudanças significativas na manufatura, especialmente na área da usinagem mecânica. Nesse cenário, os sistemas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) destacam-se por proporcionar elevada precisão dimensional, repetibilidade e aumento da produtividade industrial, tornando-se essenciais para a competitividade das empresas no contexto da Indústria 4.0 (Silva, 2022; Oliveira, 2023).

A incorporação de tecnologias automatizadas nos processos de usinagem também tem promovido alterações no perfil profissional exigido pela indústria. O uso de máquinas CNC e softwares de programação requer mão de obra qualificada, com conhecimentos em interpretação de desenhos técnicos, programação e operação de sistemas automatizados (Souza, 2021). Apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem desafios relacionados à adaptação de profissionais aos novos métodos produtivos e à necessidade constante de capacitação técnica.

Outro fator relevante nos processos de usinagem está relacionado à utilização dos fluidos lubrificantes de corte, responsáveis pela redução do atrito, controle térmico e aumento da vida útil das ferramentas de usinagem. Além disso, esses fluidos contribuem diretamente para a melhoria do acabamento superficial das peças e para a eficiência operacional do processo produtivo (Ferreira, 2020).

Paralelamente, a geração de cavacos metálicos representa um importante desafio ambiental para a indústria metalmeccânica. Quando descartados inadequadamente, esses resíduos podem causar impactos ambientais devido à presença de óleos e contaminantes. Entretanto, o reaproveitamento dos cavacos metálicos em processos de reciclagem e metalurgia do pó apresenta-se como alternativa sustentável e economicamente viável (Almeida, 2024).

O presente estudo caracteriza-se como uma Revisão Bibliográfica de abordagem qualitativa e descritiva, voltada à análise de conteúdos relacionados ao Controle Numérico Computadorizado (CNC), automação industrial, lubrificantes de corte e reaproveitamento de cavacos metálicos em processos de usinagem. A pesquisa tem como objetivo compreender tendências da manufatura moderna e seus impactos na eficiência produtiva, sustentabilidade e formação profissional.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pela necessidade de compreender como as tecnologias CNC e as práticas sustentáveis associadas ao reaproveitamento de resíduos podem contribuir para a otimização dos processos de usinagem industrial, promovendo ganhos produtivos, econômicos e ambientais.

O objetivo geral deste estudo é analisar como as tendências emergentes relacionadas ao uso de CNC podem aprimorar os processos de usinagem industrial. Como objetivos específicos, busca-se identificar as principais tecnologias aplicadas aos sistemas CNC, analisar os benefícios da automação nos processos de usinagem e descrever a importância dos fluidos lubrificantes de corte na eficiência e qualidade da produção.

2 CONCEITOS DE USINAGEM: TORNEAMENTO E CNC

A usinagem é um processo de fabricação mecânica utilizado para transformar materiais brutos em peças com dimensões e geometrias específicas por meio da remoção de material na forma de cavaco. Esse processo é considerado fundamental na indústria moderna, pois possibilita a produção de componentes com elevada precisão dimensional, qualidade superficial e excelente acabamento (Ferreira, 2020).

A usinagem é amplamente aplicada em setores como o automotivo, aeroespacial, metalúrgico, petrolífero e na fabricação de dispositivos médicos, devido à sua capacidade de produzir peças complexas e com alto nível de confiabilidade (Machado *et al.*, 2015).

Durante o processo de usinagem, a ferramenta de corte atua diretamente sobre a peça, removendo sucessivas camadas de material até atingir a forma desejada. O material removido recebe o nome de cavaco, sendo esse um elemento importante para a análise da eficiência do processo (Machado *et al.*, 2015).

A formação adequada do cavaco está relacionada às condições de corte, ao tipo de material usinado e às características da ferramenta utilizada. O controle desse processo contribui para a melhoria do acabamento superficial, redução de desgastes e maior estabilidade operacional (Souza, 2021).

Entre os diversos processos de usinagem existentes, o torneamento destaca-se como um dos mais utilizados na indústria mecânica. Nesse processo, a peça executa um movimento rotacional enquanto a ferramenta de corte realiza movimento de avanço linear sobre sua superfície, promovendo a remoção controlada do material. O torneamento é especialmente empregado na fabricação de peças cilíndricas, eixos, buchas, pinos e componentes de máquinas em geral, oferecendo elevada precisão e produtividade (Almeida, 2024).

A eficiência do torneamento depende diretamente da definição correta dos parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Esses parâmetros influenciam fatores importantes, como a temperatura na região de corte, o desgaste da ferramenta, a formação do cavaco e a qualidade final da peça usinada. Quando ajustados inadequadamente, podem ocasionar falhas dimensionais, vibrações excessivas e redução da vida útil das ferramentas de corte (Fernandes *et al.*, 2023).

Com o avanço da tecnologia industrial, os processos de usinagem passaram por significativa modernização com a introdução das máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC). O CNC consiste em um sistema automatizado capaz de controlar os movimentos da máquina-ferramenta por meio de comandos programados previamente em software (Souza, 2021).

As máquinas CNC revolucionaram os processos de torneamento ao possibilitar a fabricação de peças com geometrias complexas, maior velocidade de produção e menor índice de erros operacionais. Além disso, a automação proporcionada pelo CNC contribui para a redução de desperdícios de matéria-prima, melhoria da produtividade e maior padronização dos processos industriais (Diniz; Marcondes; Coppini, 2013).

Outro aspecto relevante relacionado ao torneamento CNC é a integração com tecnologias da Indústria 4.0. Atualmente, muitas máquinas CNC possuem

sistemas inteligentes capazes de monitorar o processo em tempo real, coletando dados sobre temperatura, desgaste da ferramenta, vibração e desempenho operacional. Essas informações permitem ajustes automáticos nos parâmetros de usinagem, aumentando a eficiência produtiva e reduzindo custos industriais (Souza, 2021).

Dessa forma, a utilização do torneamento aliado à tecnologia CNC tornou-se indispensável para a manufatura moderna, garantindo maior competitividade, qualidade e eficiência nos processos produtivos. Além de aumentar a capacidade de produção industrial, essas tecnologias contribuem para o desenvolvimento de processos mais precisos, seguros e sustentáveis (Souza, 2021).

Segundo Côrtes et al. (2024), a Indústria 4.0 fortaleceu o planejamento estratégico e a produtividade industrial por meio da digitalização e automação dos processos. O uso de tecnologias inteligentes permite maior controle das operações e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

3 NOVAS TECNOLOGIAS DO TORNEAMENTO

As novas tecnologias aplicadas ao CNC têm transformado significativamente os processos de usinagem nas indústrias modernas. Os sistemas atuais apresentam elevado nível de automação, permitindo maior precisão, rapidez e repetibilidade na fabricação de peças complexas. Segundo Silva e Reis Filho (2022), o torno CNC “consiste em uma tecnologia amplamente utilizada na usinagem” e possui elevada capacidade de executar operações com alta precisão e menor incidência de erros. Dessa forma, as empresas conseguem melhorar a produtividade e reduzir desperdícios durante a fabricação das peças.

A evolução tecnológica dos centros de torneamento está diretamente relacionada aos avanços da Indústria 4.0. Atualmente, as máquinas CNC utilizam sistemas inteligentes integrados a sensores, softwares e redes industriais que permitem monitoramento contínuo da produção. De acordo com Pinheiro e Reis Filho (2025), “a integração dessas máquinas com sistemas de produção inteligentes caracteriza um modelo de manufatura conectado, adaptativo e eficiente”. Isso possibilita maior controle das operações e otimização dos processos produtivos.

Os centros de torneamento CNC modernos possuem sistemas multieixos que permitem a fabricação de peças complexas com elevada precisão dimensional. Esses equipamentos trabalham com eixos X, Z, Y, B e C, reduzindo erros de posicionamento e aumentando a produtividade industrial. Conforme Fanuc (2023), citado por Pinheiro e Reis Filho (2025), os equipamentos modernos “possibilitam a usinagem de peças complexas em uma única fixação”. Essa característica reduz o tempo de setup e melhora a qualidade final dos produtos usinados.

Outra tecnologia importante aplicada ao CNC é o uso de softwares avançados de programação e simulação virtual. Esses sistemas permitem prever possíveis falhas antes da fabricação das peças, aumentando a segurança operacional e reduzindo retrabalhos. Segundo Siemens (2022), os sistemas CNC modernos possibilitam “monitoramento em tempo real das operações, coleta de dados e integração com sistemas MES e ERP”. Assim, as empresas conseguem controlar a produção de forma mais eficiente e inteligente.

A automação industrial também representa um dos principais avanços relacionados às tecnologias CNC. Muitos centros de torneamento modernos possuem trocadores automáticos de ferramentas e sistemas robotizados que permitem operações contínuas. De acordo com Sandvik (2022), citado por Pinheiro e Reis Filho (2025), as revistas automáticas de ferramentas “evitam paradas constantes e aumentam o aproveitamento efetivo da máquina”. Como consequência, ocorre aumento da produtividade e redução dos custos operacionais.

As novas tecnologias CNC também têm contribuído para a sustentabilidade industrial. Os equipamentos modernos realizam cortes mais precisos, reduzindo desperdícios de matéria-prima e consumo de energia elétrica. Além disso, os sistemas automatizados permitem melhor aproveitamento das ferramentas de corte e redução na geração de cavacos. Segundo Pinheiro e Reis Filho (2025), “a usinagem mais precisa reduz o consumo de matéria-prima e energia, alinhando as operações aos objetivos sustentáveis da indústria moderna”.

Outro avanço importante é o uso de inteligência artificial e manutenção preditiva nos sistemas CNC. Sensores inteligentes conseguem monitorar vibração, temperatura e desgaste das ferramentas durante o processo de usinagem. Essas informações permitem identificar falhas antes que ocorram problemas graves nos equipamentos. Conforme Siemens (2022), citado no estudo, a digitalização proporciona “ganhos em confiabilidade e estabilidade de processo, fundamentais para o ambiente competitivo atual”.

Portanto, as novas tecnologias aplicadas ao CNC representam um importante avanço para a indústria metalmeccânica. A integração entre automação, inteligência artificial, sensores inteligentes e sistemas digitais tem revolucionado os processos de torneamento e usinagem. Segundo Silva e Reis Filho (2022), “a tecnologia proveniente do torno CNC faz com que as empresas que a utilizem tenham uma margem de qualidade, competitividade e custo benéfico bem superior”. Dessa maneira, os centros de torneamento CNC consolidam-se como ferramentas essenciais para a modernização industrial.

4 CAVACOS NA USINAGEM CNC

A formação de cavacos possui grande importância nos processos de torneamento, pois influencia diretamente a qualidade superficial das peças e a eficiência operacional da usinagem. Segundo Silva *et al.* (2021), o comportamento do cavaco está relacionado às condições de corte, ao material usinado e às características da ferramenta empregada. A geração adequada dos cavacos contribui para maior estabilidade do processo e redução de falhas durante a fabricação. Dessa forma, o controle desse fenômeno é essencial para garantir produtividade e precisão industrial.

Os cavacos podem apresentar diferentes formatos durante o processo de usinagem, sendo classificados como contínuos, descontínuos e segmentados. Conforme Oliveira e Santos (2020), cavacos contínuos normalmente proporcionam melhor acabamento superficial e menor ocorrência de vibrações na máquina-ferramenta. Já os cavacos descontínuos podem comprometer a qualidade dimensional das peças e elevar os esforços mecânicos durante o corte. Assim, a análise da morfologia dos cavacos auxilia na otimização das operações industriais.

O calor gerado durante o torneamento representa um dos principais fatores responsáveis pelo desgaste das ferramentas de corte e pela redução da qualidade superficial das peças usinadas. De acordo com Ferreira et al. (2022), elevadas temperaturas na região de corte aumentam a deformação plástica do material e reduzem a estabilidade operacional do processo. O superaquecimento também pode provocar alterações microestruturais e falhas dimensionais nas peças produzidas. Nesse contexto, o uso adequado de fluidos de corte torna-se indispensável na usinagem moderna.

Os parâmetros de usinagem exercem forte influência sobre a formação dos cavacos e sobre o desempenho do torneamento. Segundo Costa e Almeida (2021), a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte devem ser ajustados de acordo com as propriedades mecânicas do material e com as condições operacionais da máquina. Parâmetros inadequados podem provocar vibrações, desgaste excessivo das ferramentas e baixa qualidade superficial das peças. Portanto, o controle dessas variáveis contribui para maior eficiência e segurança nos processos industriais.

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais influenciam diretamente o comportamento dos cavacos durante a usinagem. Conforme Barbosa et al. (2023), materiais com elevada ductilidade tendem a produzir cavacos contínuos, enquanto materiais frágeis favorecem a formação de cavacos descontínuos. Características como dureza, resistência mecânica e condutividade térmica afetam o desgaste da ferramenta e a dissipação de calor durante o corte. Assim, o conhecimento das propriedades dos materiais é fundamental para a escolha adequada das condições de usinagem.

A precisão dimensional e o acabamento superficial representam fatores fundamentais para a qualidade das peças produzidas em operações de torneamento. Segundo Moura e Lima (2020), a estabilidade na formação dos cavacos contribui significativamente para a redução de irregularidades superficiais e para o aumento da repetibilidade dimensional. A remoção eficiente dos cavacos evita danos à superfície da peça e reduz falhas no processo produtivo. Dessa maneira, o controle operacional torna-se essencial para garantir elevado padrão de qualidade industrial.

Com o avanço da automação industrial e da tecnologia CNC, os processos de torneamento passaram a apresentar maior precisão e controle operacional. De acordo com Pereira et al. (2024), sistemas computadorizados permitem ajustes automáticos dos parâmetros de corte e monitoramento em tempo real das condições de usinagem. Sensores inteligentes auxiliam na identificação de desgastes das ferramentas e na análise da formação dos cavacos durante o processo produtivo. Assim, a automação contribui para maior produtividade e melhoria da qualidade industrial.

A gestão adequada dos cavacos metálicos possui relevância ambiental e econômica na indústria moderna. Conforme Souza e Ribeiro (2022), o reaproveitamento desses resíduos contribui para a redução de desperdícios de matéria-prima e para a diminuição dos impactos ambientais causados pelos processos industriais.

Conforme Souza e Ribeiro (2022), práticas de reciclagem favorecem a sustentabilidade e reduzem custos operacionais relacionados ao descarte de resíduos metálicos. Portanto, a utilização consciente dos cavacos representa uma

estratégia importante para o desenvolvimento sustentável da manufatura contemporânea.

A evolução dos processos de usinagem tem impulsionado melhorias significativas na produtividade e na qualidade industrial. Segundo estudos recentes da área de manufatura, a integração entre controle de parâmetros, monitoramento térmico e automação CNC possibilita maior estabilidade operacional durante o torneamento. O avanço tecnológico também favorece a redução de desperdícios e o aumento da vida útil das ferramentas de corte. Dessa forma, a modernização da usinagem contribui diretamente para a competitividade da indústria contemporânea.

5 TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 APLICADAS À USINAGEM CNC

Os impactos econômicos dos processos de usinagem estão diretamente relacionados à produtividade industrial e ao uso eficiente dos recursos disponíveis. A correta definição dos parâmetros de corte contribui para reduzir desperdícios, aumentar a vida útil das ferramentas e melhorar o desempenho operacional das máquinas. Além disso, processos otimizados diminuem o consumo energético e reduzem custos de produção. Dessa forma, a eficiência na usinagem influencia diretamente os resultados financeiros das organizações industriais (Grover, 2014).

A automação industrial exerce grande influência na redução dos custos produtivos, pois reduz a necessidade de intervenção manual e aumenta a precisão das operações. O uso de máquinas CNC e sistemas integrados diminui falhas, retrabalhos e perdas de material durante a fabricação. Além disso, a padronização das operações proporciona maior controle sobre o tempo de produção e melhora a produtividade industrial (Marques, 2022).

Outro aspecto relevante está relacionado ao aproveitamento eficiente de matérias-primas e à redução de desperdícios industriais. O reaproveitamento de cavacos metálicos e a gestão adequada de resíduos contribuem para diminuir custos operacionais e impactos ambientais. Dessa forma, sustentabilidade e eficiência econômica estão diretamente associadas nos processos industriais modernos (Brasil, 2020).

A implementação de tecnologias ligadas à Indústria 4.0 também trouxe benefícios econômicos significativos para os processos de usinagem. Sistemas inteligentes permitem monitoramento em tempo real, manutenção preditiva e maior integração entre equipamentos industriais. Além disso, essas tecnologias aumentam a produtividade e reduzem paradas não programadas durante a produção (Côrtes *et al.*, 2024).

Por fim, a gestão eficiente dos processos de usinagem permite maior equilíbrio entre produtividade, qualidade e responsabilidade ambiental. Empresas que investem em inovação tecnológica e sustentabilidade conseguem reduzir custos e aumentar sua competitividade no mercado global. Além disso, práticas de gestão de resíduos industriais contribuem para maior eficiência operacional e melhor aproveitamento dos recursos produtivos (Guimarães; Amantini Neto; Rodrigues, 2022).

Segundo Davim (2023), a presença excessiva de cavacos acumulados pode comprometer sensores, sistemas de refrigeração e componentes mecânicos das

máquinas CNC, reduzindo a precisão dimensional e aumentando os custos de manutenção industrial. Nesse contexto, a utilização de ferramentas com geometrias otimizadas e sistemas modernos de refrigeração contribui para maior estabilidade do processo de corte e melhor desempenho produtivo.

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2021), os avanços tecnológicos na usinagem têm permitido o desenvolvimento de processos mais sustentáveis e eficientes, especialmente por meio da integração entre automação industrial, monitoramento inteligente e reaproveitamento de resíduos metálicos.

Os autores destacam que o gerenciamento adequado dos cavacos possibilita melhor aproveitamento energético e redução dos impactos ambientais associados à produção industrial. Dessa forma, o controle de cavacos deixou de ser apenas uma etapa operacional da usinagem e passou a representar um fator estratégico para competitividade, inovação tecnológica e sustentabilidade na indústria moderna.

5 CONCLUSÃO

As tecnologias CNC têm desempenhado papel fundamental na modernização dos processos de usinagem, proporcionando maior precisão dimensional, produtividade e controle operacional. A integração entre automação industrial, sensores inteligentes e sistemas da Indústria 4.0 contribui diretamente para a redução de falhas, otimização dos parâmetros de corte e aumento da eficiência produtiva.

O reaproveitamento de cavacos metálicos também se destaca como uma estratégia relevante para a sustentabilidade industrial, reduzindo desperdícios de matéria-prima, custos operacionais e impactos ambientais associados aos processos de fabricação. Além disso, a gestão adequada desses resíduos favorece práticas produtivas mais sustentáveis e alinhadas às exigências da manufatura contemporânea.

Observou-se ainda que o controle da formação dos cavacos influencia diretamente a qualidade superficial das peças, o desgaste das ferramentas e a estabilidade do torneamento. Dessa forma, a aplicação de tecnologias inteligentes associadas ao monitoramento em tempo real fortalece a competitividade industrial e amplia a confiabilidade dos processos de usinagem.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a realização de análises experimentais relacionadas ao comportamento dos cavacos em diferentes condições de usinagem, bem como investigações sobre o uso de sistemas inteligentes aplicados à otimização dos processos CNC e ao reaproveitamento sustentável de resíduos metálicos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. S. et al. **Recycling of metallic chips in sustainable manufacturing processes**. Journal of Materials Research and Technology, v. 28, p. 1254-1268, 2024. Acesso em: 20 abr. 2026.
- BARBOSA, R. S.; PEREIRA, L. M.; COSTA, A. P. **Influência das propriedades mecânicas dos materiais na formação de cavacos durante a usinagem**. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 55-68, 2023. Acesso em: 22 maio 2026.

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Gestão de resíduos sólidos industriais**. Brasília: MMA, 2020. Acesso em: 25 abr. 2026.
- CÔRTEZ, P. L.; SILVA, R. M.; ALMEIDA, J. F. **Tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas aos processos de usinagem**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 10, n. 2, p. 45-61, 2024. Acesso em: 18 maio 2026.
- COSTA, J. R.; ALMEIDA, F. L. **Parâmetros de usinagem e sua influência no torneamento mecânico**. Revista Científica de Processos Industriais, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 40-52, 2021. Acesso em: 28 abr. 2026.
- DAVIM, J. P. **Machining and machine-tools: research and development**. Singapore: Springer, 2023. Acesso em: 10 maio 2026.
- FERES, João. **Comando numérico computadorizado e automação industrial**. São Paulo: Érica, 2010.
- FERNANDES, Gustavo Henrique Nazareno et al. Towards green manufacturing: investigating tool coatings and cooling strategies for Inconel 718 turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 129, n. 5, p. 2257-2279, 2023.
- FERREIRA, L. C. **Fluidos de corte aplicados aos processos de usinagem**. Revista Tecnologia Industrial, v. 15, n. 2, p. 44-58, 2020. Acesso em: 30 abr. 2026.
- FERREIRA, M. A.; SOUZA, T. R.; LIMA, C. P. **Análise térmica no processo de torneamento e desgaste de ferramentas de corte**. Journal of Manufacturing and Industrial Engineering, Belo Horizonte, v. 11, n. 3, p. 77-91, 2022. Acesso em: 15 maio 2026.
- GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura: materiais, processos e sistemas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Acesso em: 02 maio 2026.
- GUIMARÃES, Cledson Lucas; AMANTINI NETO, Silvestre; RODRIGUES, Marco Antônio Gandolfo. **Aplicação da gestão de resíduos em uma metalúrgica de fabricação de móveis**. Revista FIBI-NOVA, v. II, 2020–2022. Acesso em: 12 maio 2026.
- GUIMARÃES, L. C.; AMANTINI NETO, J.; RODRIGUES, A. **Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos metálicos na indústria de usinagem**. Revista Gestão Industrial, v. 18, n. 3, p. 88-102, 2022. Acesso em: 05 maio 2026.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 8. ed. Boston: Pearson, 2021. Acesso em: 08 maio 2026.
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufatura, engenharia e tecnologia**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2016. Acesso em: 14 maio 2026.
- MACHADO, Felipe. **Estudo dos parâmetros de corte em processos de usinagem**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2021. Acesso em: 27 abr. 2026.
- MARQUES, F. **Automação industrial e processos CNC aplicados à manufatura moderna**. São Paulo: Érica, 2022. Acesso em: 09 maio 2026.
- MARQUES, Joele dos Santos. **Projeto do trabalho em um torno CNC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2022. Acesso em: 17 maio 2026.
- MOURA, D. F.; LIMA, E. S. **Qualidade superficial e precisão dimensional em operações de torneamento**. Revista Tecnologia Mecânica, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 25-38, 2020. Acesso em: 24 abr. 2026.
- OLIVEIRA, M. A.; PEREIRA, J. F. Automação industrial e usinagem CNC na Indústria 4.0. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 23, n. 1, p. 88-102, 2023. Acesso em: 19 maio 2026.
- OLIVEIRA, P. H.; SANTOS, R. C. **Morfologia dos cavacos e otimização dos processos de usinagem**. Revista de Engenharia de Produção, Recife, v. 15, n. 4, p. 66-80, 2020. Acesso em: 06 maio 2026.
- PEREIRA, A. L.; COSTA, V. M.; SILVA, J. P. **Automação CNC e monitoramento inteligente na usinagem moderna**. Revista Internacional de Tecnologia Industrial, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 88-102, 2024. Acesso em: 16 maio 2026.
- PINHEIRO, Marcelo Augusto Guiaro; REIS FILHO, Ramílio Ramalho. **O investimento em centros de torneamento e o aumento da eficiência produtiva em empresas de usinagem**. Interface Tecnológica, Taquaritinga, v. 22, n. 2, p. 813-822, 2025. Disponível em: Acesso em: 04 jun. 2026.

SILVA, R. A.; OLIVEIRA, M. S.; FERREIRA, P. C. **Formação de cavacos e estabilidade operacional no processo de torneamento.** Revista Brasileira de Usinagem, Campinas, v. 12, n. 3, p. 33-47, 2021. Acesso em: 03 maio 2026.

SILVA, Sandro Oliveira da; REIS FILHO, Ramílio Ramalho. **Torno CNC: evolução, características e importância para a usinagem.** Interface Tecnológica, Taquaritinga, v. 19, n. 1, p. 313-322, 2022. Disponível em: Acesso em: 04 jun. 2026.

SILVA, T. R. et al. **Advanced CNC machining technologies in modern manufacturing.** Materials Today Proceedings, v. 62, p. 4521-4528, 2022. Acesso em: 11 maio 2026.

SOUZA, F. R.; RIBEIRO, L. G. **Sustentabilidade e reaproveitamento de cavacos metálicos na indústria moderna.** Revista Gestão Industrial e Sustentabilidade, Salvador, v. 10, n. 2, p. 90-105, 2022. Acesso em: 13 maio 2026.

SOUZA, P. H. **Qualificação profissional na manufatura automatizada.** Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 11, n. 3, p. 77-91, 2021. Acesso em: 07 maio 2026.



Capítulo 17

ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA A INDÚSTRIA 5.0

ANALYSIS OF THE IMPORTANCE OF PREDICTIVE MAINTENANCE FOR INDUSTRY 5.0

Edmilson Lopes De Sousa Neto¹

Mirian Nunes de Carvalho Nunes²

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A transformação digital dos processos produtivos tem impulsionado a adoção de tecnologias avançadas capazes de aumentar a eficiência, a confiabilidade e a sustentabilidade das operações industriais. Nesse contexto, a manutenção preditiva destaca-se como uma estratégia fundamental para a gestão dos ativos, permitindo o monitoramento contínuo das condições operacionais dos equipamentos e a identificação antecipada de possíveis falhas. O presente estudo teve como objetivo analisar a importância da manutenção preditiva para a Indústria 5.0, destacando suas contribuições para a eficiência operacional, a redução de custos e a melhoria da confiabilidade dos sistemas produtivos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, baseada na análise de livros, artigos científicos e publicações acadêmicas recentes relacionadas à manutenção industrial e às tecnologias associadas à Indústria 5.0. Os resultados evidenciaram que a utilização de recursos como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial, Big Data e sistemas de monitoramento em tempo real amplia a capacidade de previsão de falhas e otimiza a tomada de decisões na gestão da manutenção. Além disso, observou-se que a manutenção preditiva contribui para a redução de paradas não programadas, aumento da disponibilidade dos equipamentos, melhoria da qualidade dos processos e promoção de práticas mais sustentáveis. Conclui-se que a manutenção preditiva representa uma ferramenta estratégica para as organizações que buscam adaptar-se às exigências da Indústria 5.0, fortalecendo sua competitividade e eficiência operacional.

Palavras-chave: manutenção preditiva; Indústria 5.0; eficiência operacional; inteligência artificial; gestão da manutenção.

Abstract

The digital transformation of production processes has driven the adoption of advanced technologies capable of increasing the efficiency, reliability, and sustainability of industrial operations. In this context, predictive maintenance stands out as a fundamental strategy for asset management, allowing for continuous monitoring of equipment operating conditions and the early identification of potential failures. This study aimed to analyze the importance of predictive maintenance for Industry 5.0, highlighting its contributions to operational efficiency, cost reduction, and improved reliability of production systems. The research was developed through a literature review, based on the analysis of books, scientific articles, and recent academic publications related to industrial maintenance and technologies associated with Industry 5.0. The results showed that the use of resources such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence, Big Data, and real-time monitoring systems increases the ability to predict failures and optimizes decision-making in maintenance management. Furthermore, it was observed that predictive maintenance contributes to the reduction of unscheduled downtime, increased equipment availability, improved process quality, and the promotion of more sustainable practices. It is concluded that predictive maintenance represents a strategic tool for organizations seeking to adapt to the demands of Industry 5.0, strengthening their competitiveness and operational efficiency.

Keywords: predictive maintenance; Industry 5.0; operational efficiency; artificial intelligence; maintenance management.

1 INTRODUÇÃO

A transformação digital tem promovido mudanças significativas nos processos industriais, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias capazes de aumentar a eficiência, a confiabilidade e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Nesse contexto, a manutenção industrial passou a desempenhar um papel estratégico nas organizações, deixando de ser uma atividade voltada apenas à correção de falhas para tornar-se um importante instrumento de gestão dos ativos. De acordo com Bitam (2025), a manutenção preditiva tornou-se um elemento estratégico para a gestão dos ativos industriais, contribuindo para o aumento da disponibilidade dos equipamentos, redução de custos operacionais e melhoria do desempenho produtivo por meio da integração entre Inteligência Artificial e Internet das Coisas.

Com a evolução dos conceitos da Indústria 4.0 e o surgimento da Indústria 5.0, novas tecnologias passaram a ser incorporadas aos ambientes industriais, promovendo maior integração entre sistemas inteligentes e o trabalho humano. Segundo Martínez et al. (2026), a Indústria 5.0 caracteriza-se por um modelo produtivo centrado na integração entre tecnologias inteligentes, sustentabilidade e valorização das capacidades humanas, promovendo sistemas industriais mais resilientes e eficientes. Nesse cenário, a capacidade de prever falhas e otimizar intervenções de manutenção tornou-se um fator essencial para a competitividade das organizações.

Dentre as diferentes estratégias de manutenção existentes, a manutenção preditiva tem recebido destaque por utilizar tecnologias de monitoramento contínuo para acompanhar as condições operacionais dos equipamentos e identificar possíveis falhas antes que elas provoquem interrupções nos processos produtivos. Conforme Murtaza e Saher (2025), a manutenção preditiva permite prever falhas por meio da análise contínua de dados operacionais, possibilitando intervenções planejadas e maior confiabilidade dos equipamentos industriais. Além disso, a aplicação de sensores inteligentes, Internet das Coisas (IoT), Big Data e Inteligência Artificial tem ampliado significativamente a precisão dos sistemas de monitoramento e diagnóstico.

A relevância deste estudo está relacionada à crescente necessidade de as organizações industriais adotarem soluções que conciliem eficiência operacional, sustentabilidade e inovação tecnológica. Nesse contexto, a manutenção preditiva destaca-se como uma das principais ferramentas capazes de atender às demandas da Indústria 5.0, contribuindo para a redução de desperdícios, otimização de recursos e melhoria da tomada de decisões. Dessa forma, compreender sua importância torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias industriais mais modernas e competitivas.

Diante desse cenário, surge a seguinte questão de pesquisa: qual é a importância da manutenção preditiva para a eficiência operacional e a competitividade das organizações no contexto da Indústria 5.0?

O presente estudo tem como objetivo analisar a importância da manutenção preditiva para a Indústria 5.0, destacando suas características, tecnologias associadas, benefícios, desafios de implementação e contribuições para a eficiência operacional, confiabilidade dos equipamentos e sustentabilidade dos processos industriais.

2 A MANUTENÇÃO PREDITIVA COMO FERRAMENTA PARA QUALIDADE INDUSTRIAL

A manutenção preditiva é uma estratégia de gestão da manutenção baseada no monitoramento contínuo das condições operacionais dos equipamentos, permitindo a identificação antecipada de possíveis falhas antes que elas provoquem interrupções nos processos produtivos. Diferentemente das abordagens corretiva e preventiva, essa modalidade utiliza informações obtidas em tempo real por meio de sensores, sistemas de monitoramento e análise de dados, possibilitando intervenções mais precisas e eficientes. Segundo Bitam (2025), a manutenção preditiva baseada em AIoT possibilita monitoramento contínuo dos ativos industriais, reduzindo falhas inesperadas e aumentando a eficiência operacional.

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias digitais ampliou as possibilidades de aplicação da manutenção preditiva em diversos segmentos industriais. Ferramentas como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial e Machine Learning passaram a desempenhar papel fundamental na coleta e interpretação de dados operacionais. De acordo com Ramzan (2025), os avanços recentes em Inteligência Artificial, aprendizado de máquina e análise de dados permitem identificar padrões operacionais complexos, favorecendo previsões mais precisas sobre falhas em equipamentos industriais.

Além dos benefícios relacionados à confiabilidade dos ativos, a manutenção preditiva exerce importante influência sobre a qualidade industrial. A identificação antecipada de desgastes, desalinhamentos, vibrações excessivas e outros fatores que possam comprometer o desempenho dos equipamentos contribui para a estabilidade dos processos produtivos e para a redução de defeitos nos produtos finais. Conforme Bharati *et al.* (2025), organizações que utilizam manutenção preditiva baseada em IoT e análise de dados apresentam ganhos significativos em qualidade, disponibilidade dos equipamentos e produtividade industrial.

Nesse contexto, a manutenção preditiva tornou-se uma importante ferramenta de gestão da qualidade industrial, permitindo maior controle sobre os processos produtivos e contribuindo para o aumento da competitividade das organizações. Sua aplicação favorece não apenas a redução de custos associados a falhas inesperadas, mas também a melhoria contínua dos processos e a satisfação dos clientes por meio da entrega de produtos com maior padrão de qualidade.

3 O AVANÇO DA INDÚSTRIA 5.0 NAS MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

A Indústria 5.0 representa uma nova fase da evolução industrial, caracterizada pela integração entre tecnologias inteligentes e a valorização das capacidades humanas nos ambientes produtivos. Diferentemente da Indústria 4.0, que priorizou a automação e a conectividade dos sistemas, a Indústria 5.0 busca promover uma relação mais colaborativa entre seres humanos e máquinas, incorporando princípios de sustentabilidade, resiliência e personalização dos processos produtivos. Segundo Martínez *et al.* (2026), a Indústria 5.0 amplia os conceitos da digitalização industrial ao incorporar sustentabilidade, resiliência e colaboração entre seres humanos e sistemas inteligentes. Os avanços tecnológicos associa-

dos à Indústria 5.0 têm provocado mudanças significativas no funcionamento das máquinas e equipamentos industriais. Sistemas inteligentes equipados com sensores avançados, dispositivos conectados à Internet das Coisas (IoT) e algoritmos de Inteligência Artificial passaram a permitir o monitoramento contínuo das condições operacionais dos ativos. Essa conectividade proporciona maior controle sobre os processos produtivos, além de possibilitar respostas rápidas diante de variações operacionais e potenciais falhas.

Outra tendência relevante é a utilização dos chamados Digital Twins, ou gêmeos digitais, que consistem em representações virtuais de máquinas e equipamentos físicos. Conforme Nagy (2026), a utilização de Digital Twins possibilita simulações em tempo real e apoio à tomada de decisão, contribuindo para a eficiência operacional e para a confiabilidade dos equipamentos industriais.

Além disso, os equipamentos industriais modernos passaram a incorporar sistemas autônomos capazes de aprender continuamente a partir dos dados gerados durante sua operação. Essa capacidade de adaptação permite ajustes automáticos nos processos produtivos, favorecendo a otimização dos recursos e a sustentabilidade industrial. Dessa forma, a Indústria 5.0 promove uma transformação significativa na maneira como máquinas e equipamentos são operados, monitorados e gerenciados dentro das organizações.

4 A MANUTENÇÃO PREDITIVA NA INDÚSTRIA 5.0

A manutenção preditiva é considerada uma das principais estratégias para atender às demandas da Indústria 5.0, uma vez que sua aplicação está diretamente relacionada ao uso de tecnologias inteligentes e à gestão eficiente dos ativos industriais. O monitoramento contínuo das condições dos equipamentos permite que falhas sejam identificadas antes de comprometerem a produção, reduzindo custos operacionais e aumentando a confiabilidade dos sistemas produtivos.

No contexto da Indústria 5.0, a manutenção preditiva utiliza recursos como sensores inteligentes, Internet das Coisas, Inteligência Artificial e análise avançada de dados para acompanhar o desempenho dos equipamentos em tempo real. Segundo Bukowski e Werbinska-Wojciechowska (2025), a integração entre Inteligência Artificial, Digital Twins e sistemas de monitoramento inteligente fortalece a capacidade preditiva das organizações e favorece operações mais resilientes.

Outro aspecto relevante é a contribuição da manutenção preditiva para a sustentabilidade industrial. Ao permitir intervenções apenas quando realmente necessárias, essa estratégia reduz o desperdício de materiais, aumenta a vida útil dos componentes e otimiza o consumo de recursos energéticos. Conforme Nagy (2026), a manutenção preditiva baseada em dados contribui para a sustentabilidade industrial ao reduzir desperdícios, otimizar recursos e aumentar a capacidade de adaptação dos sistemas produtivos. Além dos benefícios econômicos e ambientais, a manutenção preditiva favorece a segurança dos trabalhadores e a confiabilidade dos processos produtivos. A identificação antecipada de falhas reduz os riscos de acidentes e evita interrupções inesperadas que podem comprometer a produtividade das organizações. Dessa forma, sua aplicação representa um importante diferencial competitivo para empresas que buscam modernizar seus processos e se adaptar às exigências da nova realidade industrial.

5 CONCLUSÃO

A manutenção preditiva tem se consolidado como uma importante estratégia para a gestão eficiente dos ativos industriais, especialmente diante das transformações tecnológicas promovidas pela Indústria 5.0. A partir da análise realizada, foi possível verificar que a utilização de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial, Big Data e sistemas de monitoramento em tempo real tem ampliado a capacidade das organizações de identificar falhas antecipadamente, reduzindo paradas não planejadas e aumentando a confiabilidade dos equipamentos. Dessa forma, a manutenção preditiva deixa de atuar apenas como uma ferramenta operacional e passa a exercer papel estratégico na busca pela eficiência e competitividade industrial.

Observou-se também que a integração da manutenção preditiva com os princípios da Indústria 5.0 contribui significativamente para a melhoria dos processos produtivos, permitindo maior controle das operações, otimização dos recursos e aumento da qualidade dos produtos. Além dos benefícios econômicos relacionados à redução de custos de manutenção e ao aumento da disponibilidade dos equipamentos, essa estratégia favorece práticas mais sustentáveis, reduzindo desperdícios e promovendo o uso racional dos recursos industriais. Nesse contexto, a manutenção preditiva demonstra estar alinhada aos objetivos de inovação, sustentabilidade e valorização do fator humano propostos pela nova revolução industrial.

Diante dos aspectos analisados, conclui-se que a manutenção preditiva representa um elemento fundamental para o desenvolvimento da Indústria 5.0, contribuindo para operações mais inteligentes, seguras e eficientes. O objetivo deste estudo foi alcançado ao evidenciar a relevância dessa estratégia para o desempenho organizacional e para a adaptação das empresas às novas demandas tecnológicas. Como limitação da pesquisa, destaca-se o fato de ter sido baseada exclusivamente em revisão bibliográfica. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros investiguem aplicações práticas da manutenção preditiva em diferentes segmentos industriais, analisando seus impactos sobre indicadores de produtividade, sustentabilidade e competitividade empresarial.

REFERÊNCIAS

- BHARATI, P. V. et al. **IoT and Predictive Maintenance in Industrial Engineering: A Data-Driven Approach**. 2025.
- BITAM, T. Artificial Intelligence of Things for Next-Generation Predictive Maintenance in Industry 5.0. **Sensors**, 2025.
- BUKOWSKI, L.; WERBINSKA-WOJCIECHOWSKA, S. Towards Maintenance 5.0: Resilience-Based Maintenance in AI-Driven Sustainable and Human-Centric Industrial Systems. **Sensors**, 2025.
- MARTÍNEZ, M. A. D. et al. **A Systematic Review of Industry 5.0 and Sustainability in Manufacturing**. 2026.
- MURTAZA, M.; SAHER, S. **Paradigm Shift for Predictive Maintenance and Condition Monitoring in Industry 5.0**. 2025.
- NAGY, M. Digitalization-Based Predictive Maintenance Systems and Industry 5.0. **Systems**, 2026.
- RAMZAN, F. **A Literature Review on Enhancing Predictive Maintenance in Industry 5.0**. 2025.



Capítulo 18

INTEGRIDADE DE FIBRAS ÓPTICAS E SUA INFLUÊNCIA NA CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS

INTEGRITY OF OPTICAL FIBERS AND ITS INFLUENCE ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF ELECTRICAL SUBSTATIONS

Marcos Vinicius Oliveira de Carvalho¹

Mirian Nunes de Carvalho Nunes²

Lilian Barros Santiago³

¹ Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

² Docente, Desenhista Industrial, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

³ Docente, Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís - MA

Resumo

A crescente digitalização das subestações elétricas ampliou a utilização de sistemas de comunicação baseados em fibra óptica, tornando a integridade dos enlaces um fator essencial para garantir a confiabilidade operacional das instalações. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da integridade das fibras ópticas no desempenho dos sistemas de automação, supervisão e proteção em subestações elétricas. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica qualitativa e descritiva, utilizando livros técnicos, artigos científicos, normas técnicas e dissertações relacionadas à comunicação óptica, automação de subestações e confiabilidade operacional. Os resultados demonstraram que falhas como microcurvaturas, degradação de conectores, emendas inadequadas e envelhecimento dos cabos podem comprometer significativamente a transmissão dos sinais ópticos, afetando funções críticas dos sistemas elétricos. Verificou-se também que ferramentas de diagnóstico, como OTDR e Power Meter, desempenham papel fundamental na identificação preventiva de perdas ópticas e anomalias nos enlaces. Além disso, observou-se que a adoção de arquiteturas redundantes e a aplicação das normas técnicas contribuem para aumentar a disponibilidade e a segurança operacional das subestações digitais. Conclui-se que a integridade das fibras ópticas representa um elemento estratégico para assegurar estabilidade, eficiência e confiabilidade aos sistemas elétricos modernos.

Palavras-chave: Fibra óptica. Subestações elétricas. Confiabilidade operacional. IEC 61850. Redes ópticas.

Abstract

The increasing digitalization of electrical substations has expanded the use of communication systems based on optical fiber, making the integrity of these links an essential factor in ensuring the operational reliability of installations. In this context, the present study aimed to analyze the influence of optical fiber integrity on the performance of automation, supervision, and protection systems in electrical substations. The research was developed through a qualitative and descriptive literature review, using technical books, scientific articles, technical standards, and dissertations related to optical communication, substation automation, and operational reliability. The results demonstrated that failures such as microbending, connector degradation, improper splicing, and cable aging can significantly compromise the transmission of optical signals, affecting critical functions of electrical systems. It was also found that diagnostic tools, such as OTDR and Power Meter, play a fundamental role in the preventive identification of optical losses and anomalies in the links. In addition, it was observed that the adoption of redundant architectures and the application of technical standards contribute to increasing the availability and operational safety of digital substations. It is concluded that the integrity of optical fibers represents a strategic element in ensuring stability, efficiency, and reliability in modern electrical systems.

Keywords: Optical fiber. Electrical substations. Operational reliability. IEC 61850. Optical networks.

1 INTRODUÇÃO

A crescente digitalização das infraestruturas do setor elétrico modificou a forma como as subestações realizam a troca de informações entre seus equipamentos de proteção, automação e supervisão. Nesse processo, os enlaces ópticos passaram a ocupar um papel essencial, pois oferecem desempenho compatível com as exigências de sistemas que operam com elevado fluxo de dados e necessitam de comunicação estável e contínua. A expansão dessas arquiteturas tornou a integridade da fibra óptica um componente indispensável para assegurar a confiabilidade operacional das instalações elétricas.

À medida que funções automatizadas se tornaram mais complexas e dependentes de trocas rápidas de informação, cresceu também a necessidade de manter os enlaces ópticos em condições adequadas de funcionamento. Pequenas alterações ao longo do cabo, como irregularidades em emendas, degradação de conectores ou curvaturas além dos limites recomendados, podem comprometer seriamente a performance dos sinais transmitidos. Esse cenário justificou a realização de estudos que abordassem a importância do monitoramento das fibras utilizadas em subestações, de modo a evitar interferências em processos críticos que exigem elevado grau de precisão.

Diante dessa realidade, estabeleceu-se o problema de pesquisa que direcionou o presente trabalho: como a verificação sistemática das fibras ópticas pode contribuir para preservar a confiabilidade operacional de subestações? A resposta a essa questão envolve compreender os fatores que afetam o comportamento da fibra, além de analisar as consequências que essas alterações podem gerar em equipamentos responsáveis por funções essenciais à operação do sistema elétrico.

Com base nesse problema, definiu-se como objetivo geral avaliar a relação entre a integridade das fibras ópticas e a confiabilidade das subestações. Para alcançar tal finalidade, foram estabelecidos objetivos específicos que incluíram o estudo das propriedades técnicas da fibra, a análise de métodos empregados em medições, o desenvolvimento de testes práticos e a interpretação dos resultados obtidos, visando identificar pontos de perda ou eventos que indicassem degradação do enlace.

A introdução, portanto, apresenta os elementos que fundamentaram a pesquisa e evidencia a necessidade de acompanhar continuamente o desempenho óptico nas subestações. A abordagem adotada permitiu explorar como métodos de avaliação contribuem para ações de manutenção preventiva e para a mitigação de falhas que comprometam a comunicação entre dispositivos críticos, reforçando a pertinência do tema no contexto das exigências atuais de confiabilidade do setor elétrico.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica com enfoque qualitativo e descritivo, cujo propósito foi reunir e interpretar conheci-

mentos publicados sobre a integridade de enlaces ópticos empregados em subestações de energia. A escolha por esse tipo de abordagem decorre da intenção de analisar informações já consolidadas na literatura, sem a realização de experimentos, levantamento de dados quantitativos, formulação de hipóteses ou qualquer intervenção prática, atendendo às características de pesquisas exclusivamente teóricas.

A seleção das fontes consultadas contemplou materiais publicados nos últimos cinco anos, de modo a garantir que o conteúdo analisado fosse compatível com as tecnologias e procedimentos atuais utilizados no setor elétrico. Foram considerados livros técnicos relacionados a fibras ópticas, telecomunicações, automação e sistemas elétricos de potência; artigos científicos indexados em bases amplamente reconhecidas; normas técnicas nacionais e internacionais pertinentes às medições ópticas; manuais de fabricantes de instrumentos como OTDR e Power Meter; além de documentos institucionais ligados à operação e manutenção de redes ópticas em ambientes industriais e elétricos. Para compor o corpus da pesquisa, somente foram incluídos textos completos, escritos em português ou inglês, que apresentassem conteúdo técnico relevante sobre enlaces ópticos, métodos de medição e diagnóstico, confiabilidade de sistemas ópticos ou aplicações de fibra óptica em subestações.

Foram adotados critérios de exclusão para assegurar a qualidade e coerência das fontes empregadas. Assim, não foram considerados resumos, revisões de literatura, comentários, documentos sem identificação de autoria, materiais opinativos, publicações sem rigor técnico ou textos cujo escopo não dialogasse diretamente com os tópicos centrais da pesquisa. O objetivo dessa filtragem foi garantir que o material analisado permitisse compreender de forma consistente os princípios de funcionamento das tecnologias ópticas, os métodos de medição utilizados e as relações entre integridade dos enlaces e desempenho dos sistemas de automação, supervisão e teleproteção.

A busca pelos materiais foi realizada em bases de dados de amplo uso acadêmico e técnico, como Google Acadêmico, SciELO, Portal de Periódicos da CAPES e repositórios de teses e dissertações. Para direcionar a busca, foram empregados descritores específicos em língua portuguesa, selecionados de acordo com a temática do estudo, tais como: “fibra óptica em subestações”, “enlace óptico”, “OTDR”, “Power Meter”, “diagnóstico óptico”, “confiabilidade de sistemas ópticos” e “integridade de enlaces”. A utilização desses termos possibilitou localizar conteúdos essenciais para compreender o funcionamento das medições ópticas, os processos de diagnóstico de falhas, a interpretação dos resultados obtidos e o impacto da condição dos enlaces na operação de sistemas elétricos.

A partir da análise criteriosa das fontes selecionadas, foi possível estabelecer a base teórica necessária para discutir de que maneira as medições realizadas com OTDR e Power Meter contribuem para a avaliação da integridade das redes ópticas e, conseqüentemente, para a confiabilidade operacional das subestações de energia.

2.2 Resultados e Discussão

Os resultados da revisão bibliográfica demonstraram que a integridade das fibras ópticas constitui um dos pilares da confiabilidade operacional em subes-

tações digitais e convencionais com sistemas de automação baseados na IEC 61850. A literatura aponta que a migração dos circuitos de cobre para enlaces ópticos elevou significativamente a imunidade a interferências eletromagnéticas, sobretudo em ambientes de alta tensão, onde transitórios, surtos e campos induzidos comprometem meios metálicos convencionais. Nesse contexto, a fibra óptica passou a ser elemento estratégico na troca de mensagens GOOSE, Sampled Values e sincronismo entre IEDs, switches industriais e sistemas supervisórios.

A análise comparativa dos estudos revelou que as falhas mais recorrentes em enlaces ópticos de subestações estão associadas a micro curvaturas, macro dobras, emendas mal executadas, contaminação em conectores, excesso de tração mecânica e envelhecimento térmico da capa externa. Esses fatores elevam a atenuação e reduzem a margem óptica disponível, produzindo perda intermitente de comunicação, aumento de latência e falhas em comandos críticos de proteção. Em aplicações de proteção diferencial de linha, por exemplo, a perda momentânea de comunicação pode ocasionar bloqueio de função, aumento do tempo de atuação ou indisponibilidade parcial do sistema de proteção.

A literatura nacional reforça que a correta instalação dos cabos ópticos, seguindo raios mínimos de curvatura e critérios de acomodação em DIOs, é determinante para a vida útil do enlace. As recomendações técnicas da Furukawa convergem com as orientações da ABNT quanto à padronização construtiva, identificação dos cabos e critérios de montagem. Isso demonstra que a confiabilidade do sistema não depende apenas do material da fibra, mas do conjunto completo da infraestrutura passiva.

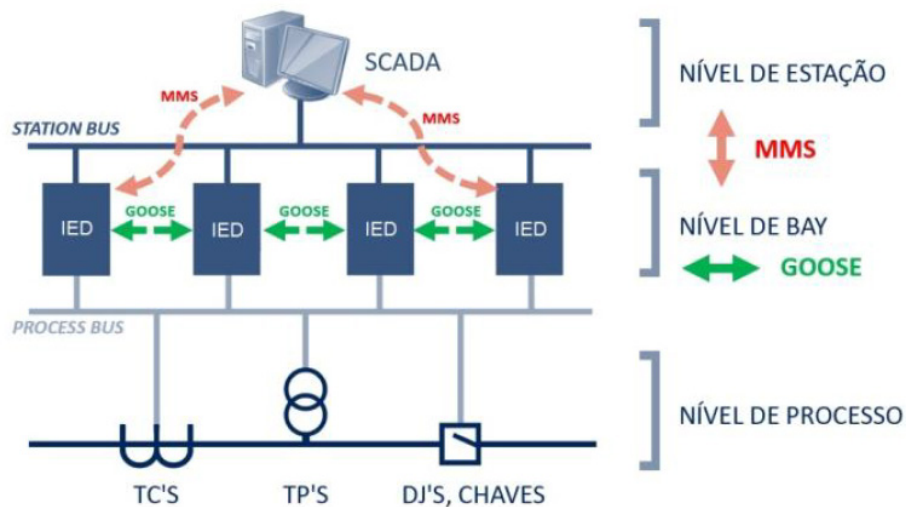


Figura 1. Arquitetura típica de comunicação óptica em subestação baseada na IEC 61850

Fonte: Adaptação da literatura sobre IEC 61850 e automação de subestações

A Figura 1 ilustra a arquitetura típica de comunicação em subestações modernas, evidenciando o uso da fibra óptica entre os níveis de processo, vão e estação. A segregação por camadas favorece redundância, interoperabilidade entre fabricantes e maior confiabilidade dos serviços de proteção e controle.

Observou-se ainda predominância do uso de fibras monomodo em subestações, especialmente em enlaces de backbone e comunicação entre casas de comando. Tal preferência decorre da menor dispersão modal e maior alcance, características compatíveis com os requisitos de latência e disponibilidade da IEC 61850.

A utilização de OTDR foi apontada como principal ferramenta preditiva para manutenção da infraestrutura óptica em subestações, permitindo identificar pontos de perda localizada, reflexões anormais e degradação progressiva das emendas antes da falha total do enlace.

A adoção da fibra óptica em subestações digitais também está relacionada ao aumento da demanda por sistemas mais rápidos, seguros e resistentes a interferências eletromagnéticas. Em ambientes energizados, a presença de campos elétricos intensos pode comprometer severamente os meios de transmissão convencionais, tornando a comunicação óptica uma alternativa mais confiável para aplicações críticas de supervisão e proteção (Vicente, 2011).

Os estudos analisados demonstraram que os enlaces ópticos passaram a desempenhar funções essenciais em arquiteturas modernas baseadas na IEC 61850, principalmente na transmissão de mensagens GOOSE e Sampled Values. Essas informações necessitam de baixa latência e elevada disponibilidade para garantir respostas rápidas dos sistemas de proteção em situações de falha elétrica (Silva, 2021).

Outro aspecto relevante observado na literatura foi a crescente utilização de redes redundantes em anel óptico, permitindo maior tolerância a falhas. Em situações de rompimento parcial do enlace, a redundância possibilita o redirecionamento automático do tráfego de dados, evitando a interrupção da comunicação entre IEDs e sistemas supervisórios (Moraes, 2021).

Os autores destacam ainda que a integridade física da fibra óptica influencia diretamente o desempenho dos equipamentos conectados à rede. Pequenos danos estruturais podem aumentar significativamente a atenuação óptica, ocasionando perda de pacotes, falhas de sincronismo e atrasos nos comandos operacionais das subestações (Furukawa Electric LATAM, 2023).

A manutenção preventiva foi apresentada como uma das principais estratégias para garantir a confiabilidade operacional dos enlaces ópticos. A realização periódica de inspeções permite identificar degradações antes que elas provoquem falhas críticas no sistema elétrico, reduzindo custos com manutenção corretiva e indisponibilidade operacional (Santos, 2022).

A análise bibliográfica também evidenciou que a qualidade das emendas ópticas possui influência significativa na eficiência da transmissão. Emendas mal executadas aumentam as perdas ópticas e produzem reflexões que comprometem o desempenho da rede de comunicação industrial utilizada nas subestações (ABB, 2021).

Além das emendas, a limpeza inadequada dos conectores foi apontada como uma das principais causas de degradação dos enlaces ópticos. Partículas microscópicas presentes nas superfícies de conexão podem alterar a propagação da luz e elevar consideravelmente os índices de atenuação do sistema (SIEMENS ENERGY, 2023).

A literatura destaca que a correta acomodação dos cabos em bandejamentos e distribuidores internos ópticos reduz riscos de microcurvaturas. Essas deformações estruturais podem ocorrer de forma imperceptível, mas são capazes de alterar o comportamento do sinal óptico transmitido ao longo do enlace (Furukawa Electric LATAM, 2023).

Os resultados obtidos nos estudos reforçaram a importância do uso de fi-

bras monomodo em aplicações de longa distância dentro de subestações. Esse tipo de fibra apresenta menor dispersão modal e melhor desempenho em sistemas que exigem alta estabilidade e baixa perda de sinal (ABNT, 2022).

Também foi observado que o crescimento das subestações digitais ampliou a necessidade de integração entre equipamentos de diferentes fabricantes. Nesse cenário, a interoperabilidade proporcionada pela IEC 61850 tornou-se fundamental para assegurar a comunicação padronizada entre dispositivos eletrônicos inteligentes (Vicente, 2011).

A utilização de switches industriais gerenciáveis foi frequentemente associada ao aumento da confiabilidade das redes ópticas em ambientes elétricos. Esses dispositivos permitem segmentação lógica, controle de tráfego e monitoramento contínuo das condições operacionais da comunicação (Cisco Systems, 2022).

Outro fator discutido nos estudos refere-se à importância da sincronização temporal em subestações digitais. A troca de dados entre dispositivos exige precisão temporal elevada, principalmente em aplicações de proteção diferencial e monitoramento em tempo real (Miranda, 2016).

Os autores também apontaram que a utilização de protocolos redundantes reduz significativamente o tempo de recuperação da comunicação após falhas físicas no enlace óptico. Esse recurso é essencial para preservar a continuidade operacional dos sistemas elétricos automatizados (Siemens Energy, 2023).

A análise dos materiais evidenciou que as falhas ópticas nem sempre provocam interrupção total da comunicação. Em muitos casos, ocorre degradação gradual do desempenho, dificultando a identificação imediata do problema sem instrumentos específicos de medição (Santos, 2022).

Nesse contexto, o OTDR foi amplamente citado como ferramenta indispensável para análise preditiva. O equipamento permite localizar eventos ópticos ao longo da fibra, identificar reflexões anormais e medir perdas associadas a emendas, conectores e curvaturas excessivas (Furukawa Electric LATAM, 2023).

O uso do Power Meter também foi mencionado como método complementar de avaliação da potência óptica recebida. A associação entre OTDR e Power Meter amplia a precisão do diagnóstico e melhora a interpretação das condições reais do enlace (ABB, 2021).

Os estudos destacaram ainda que ambientes industriais energizados submetem os cabos ópticos a condições severas de temperatura, vibração mecânica e umidade. Esses fatores aceleram o desgaste da infraestrutura e exigem maior rigor nos procedimentos de instalação e manutenção (ABNT, 2025).

Observou-se que a confiabilidade operacional das subestações depende não apenas dos equipamentos ativos, mas também da integridade da infraestrutura passiva. Assim, a fibra óptica deixou de ser apenas meio de transmissão e passou a representar componente estratégico do sistema elétrico (Moraes, 2021).

Outro aspecto relevante identificado foi a necessidade de capacitação técnica das equipes responsáveis pela manutenção óptica. A ausência de procedimentos padronizados pode resultar em erros de instalação, medições incorretas e aumento das falhas operacionais (Silva, 2021).

A literatura também evidenciou que a expansão das Smart Grids intensifi-

cou a utilização de redes ópticas em sistemas elétricos de potência. O aumento da digitalização elevou a dependência de enlaces confiáveis para garantir monitoramento remoto e automação em tempo real (Cunha, 2011).

Os autores ressaltam que falhas em sistemas de comunicação podem afetar diretamente a seletividade e a rapidez das proteções elétricas. Em aplicações críticas, atrasos de milissegundos podem comprometer a estabilidade do sistema elétrico interligado (Miranda, 2016).

Foi identificado que a adoção de arquiteturas distribuídas elevou a complexidade dos sistemas de automação. Dessa forma, a necessidade de monitoramento contínuo da infraestrutura óptica tornou-se indispensável para garantir disponibilidade operacional elevada (Matsuo, 2015).

A revisão bibliográfica mostrou que projetos modernos de subestações priorizam o uso de fibras ópticas devido à elevada imunidade eletromagnética. Diferentemente dos cabos metálicos, a fibra não sofre influência direta de campos induzidos presentes em ambientes de alta tensão (ABB, 2021).

Os estudos também demonstraram que a segmentação lógica por VLANs contribui para melhorar o desempenho das redes industriais ópticas. Essa estratégia reduz congestionamentos e favorece a priorização de mensagens críticas de proteção e controle (Cisco Systems, 2022).

Outro ponto frequentemente discutido refere-se à importância da documentação técnica da infraestrutura óptica. Registros atualizados facilitam inspeções futuras, agilizam processos de manutenção e reduzem o tempo de resposta diante de falhas operacionais (Silva, 2021).

A análise dos autores permitiu compreender que a confiabilidade dos sistemas ópticos depende da integração entre boas práticas de instalação, monitoramento contínuo e conformidade com normas técnicas nacionais e internacionais (ABNT, 2019).

Além disso, observou-se que o envelhecimento natural dos componentes ópticos pode provocar degradação gradual da transmissão. Esse processo reforça a necessidade de avaliações periódicas para identificar tendências de perda antes da ocorrência de falhas críticas (Furukawa Electric LATAM, 2023).

Os resultados encontrados demonstraram que a manutenção baseada em condição apresenta maior eficiência quando comparada aos modelos corretivos tradicionais. A identificação antecipada de anomalias reduz riscos operacionais e melhora a disponibilidade dos sistemas elétricos (Santos, 2022).

A literatura também destacou que os investimentos em infraestrutura óptica contribuem para aumentar a segurança operacional das subestações. Redes confiáveis minimizam interrupções e favorecem maior estabilidade dos sistemas de automação e proteção (Moraes, 2021).

A discussão dos resultados permitiu concluir que a integridade da fibra óptica deixou de ser apenas requisito físico de transmissão e passou a representar uma variável crítica da confiabilidade funcional de subestações digitalizadas, especialmente em projetos de retrofit e expansão de automação. A redundância em anel, a segmentação lógica por VLANs, o monitoramento contínuo por OTDR e a conformidade com normas ABNT e IEC mostraram-se fatores decisivos para elevar a disponibilidade do sistema.

3 CONCLUSÃO

A presente pesquisa permitiu compreender a importância da integridade das fibras ópticas para a confiabilidade operacional das subestações modernas. Ao longo do estudo, observou-se que a crescente digitalização do setor elétrico tornou os sistemas de comunicação componentes indispensáveis para o funcionamento seguro das instalações energizadas.

O desenvolvimento das subestações digitais elevou significativamente a dependência de redes ópticas para transmissão de dados entre equipamentos de proteção, supervisão e automação. Dessa forma, a integridade física dos enlaces passou a exercer influência direta sobre a estabilidade operacional dos sistemas elétricos.

Os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, uma vez que foi possível analisar os fatores que interferem na qualidade da transmissão óptica e compreender como essas alterações podem comprometer a comunicação entre dispositivos críticos presentes nas subestações.

A pesquisa demonstrou que a utilização da fibra óptica oferece vantagens importantes em ambientes de alta tensão, principalmente devido à elevada imunidade a interferências eletromagnéticas. Essa característica contribui para maior estabilidade da comunicação quando comparada aos meios metálicos convencionais.

Também foi possível verificar que falhas aparentemente pequenas, como curvaturas inadequadas, sujeira em conectores e emendas mal executadas, podem provocar degradação significativa no desempenho da rede óptica utilizada em sistemas de automação elétrica.

A análise da literatura permitiu compreender que a confiabilidade operacional não depende apenas dos equipamentos ativos das subestações. A infraestrutura passiva, composta pelos enlaces ópticos, tornou-se igualmente estratégica para garantir continuidade operacional e segurança do sistema.

Outro ponto importante observado foi a predominância do uso de fibras monomodo em aplicações de backbone e comunicação entre casas de comando. Essa escolha ocorre devido ao menor índice de dispersão modal e à maior eficiência na transmissão em longas distâncias.

A pesquisa também evidenciou a importância da norma IEC 61850 para a padronização das comunicações em subestações digitais. A interoperabilidade proporcionada por essa norma favorece integração entre equipamentos de diferentes fabricantes e amplia a confiabilidade operacional.

Foi possível identificar que as arquiteturas redundantes representam um recurso essencial para reduzir impactos causados por falhas em enlaces ópticos. A redundância garante continuidade da comunicação mesmo diante de rompimentos parciais da rede.

Outro aspecto relevante identificado no estudo refere-se ao uso do OTDR como ferramenta de diagnóstico preditivo. O equipamento possibilita identificar eventos ópticos, perdas e reflexões anormais antes que ocorram falhas completas na infraestrutura de comunicação.

Além do OTDR, verificou-se que o Power Meter também possui papel importante na avaliação da potência óptica transmitida. A utilização conjunta des-

ses instrumentos amplia a precisão das análises e melhora o processo de manutenção preventiva.

A revisão bibliográfica demonstrou que a manutenção preditiva apresenta vantagens significativas em relação aos modelos corretivos tradicionais. A identificação antecipada de falhas reduz custos operacionais e minimiza riscos de indisponibilidade do sistema elétrico.

Observou-se ainda que o crescimento das Smart Grids aumentou a necessidade de redes ópticas mais confiáveis e eficientes. O monitoramento em tempo real e a automação avançada dependem diretamente da estabilidade dos enlaces de comunicação.

Outro resultado importante da pesquisa foi a compreensão de que o envelhecimento natural dos componentes ópticos pode provocar degradação gradual do desempenho da rede. Isso reforça a necessidade de inspeções periódicas e monitoramento contínuo.

A pesquisa também permitiu verificar que fatores ambientais, como temperatura elevada, vibração mecânica e umidade, exercem influência direta sobre a vida útil da infraestrutura óptica instalada em ambientes industriais energizados.

Os estudos analisados mostraram que a correta instalação dos cabos ópticos é fundamental para garantir desempenho adequado ao longo do tempo. Procedimentos inadequados de acomodação podem gerar microcurvaturas e perdas ópticas significativas.

Outro aspecto observado foi a importância da limpeza dos conectores ópticos durante procedimentos de manutenção. Pequenas partículas contaminantes podem comprometer a propagação do sinal e reduzir a eficiência da comunicação.

O trabalho também evidenciou que a capacitação técnica das equipes de manutenção possui grande relevância para a confiabilidade operacional das subestações digitais. Profissionais qualificados reduzem erros de instalação e melhoram os processos de diagnóstico.

A análise da literatura reforçou que a segmentação lógica das redes industriais contribui para maior organização e controle do tráfego de dados. Essa prática favorece priorização das mensagens críticas de proteção e automação.

Os resultados encontrados demonstraram que falhas de comunicação podem afetar diretamente funções críticas de proteção elétrica. Em alguns casos, atrasos mínimos na transmissão podem comprometer a estabilidade do sistema elétrico.

A pesquisa possibilitou compreender que a integridade da fibra óptica deve ser tratada como variável estratégica dentro dos sistemas elétricos modernos. Sua influência ultrapassa a simples transmissão de dados e impacta diretamente a confiabilidade funcional das subestações.

Também foi possível concluir que os investimentos em infraestrutura óptica proporcionam benefícios importantes para o setor elétrico, principalmente em relação à segurança operacional, estabilidade da comunicação e redução de falhas críticas.

Outro ponto relevante identificado foi a necessidade de atualização constante das normas técnicas relacionadas ao cabeamento estruturado e às redes

ópticas industriais. A evolução tecnológica exige adequações contínuas dos padrões utilizados.

A pesquisa apresentou como limitação a ausência de testes práticos em campo, uma vez que o estudo foi desenvolvido exclusivamente por meio de revisão bibliográfica. Apesar disso, os materiais analisados forneceram embasamento técnico consistente para atingir os objetivos propostos.

Por fim, conclui-se que a integridade das fibras ópticas representa um elemento indispensável para assegurar a confiabilidade operacional das subestações digitais. O monitoramento contínuo, a manutenção preventiva e a aplicação correta das normas técnicas mostraram-se fundamentais para garantir eficiência, estabilidade e segurança aos sistemas elétricos modernos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13486**: fibras ópticas — terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/9988/abnt-nbr13486-fibras-opticas-terminologia>. Acesso em: 7 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13488**: fibra óptica tipo monomodo — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/28379/nbr13488-fibra-optica-tipo-monomodo-de-dispersao-normal-especificacao>. Acesso em: 7 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14565**: cabeamento estruturado para edifícios comerciais e data centers. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/20583/abnt-nbr14565-cabeamento-estruturado-para-edificios-comerciais>. Acesso em: 7 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16521**: cabeamento estruturado industrial. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/11783/abnt-nbr16521-cabeamento-estruturado-industrial>. Acesso em: 7 maio 2026.

ABB. **Guia técnico de automação e comunicação em subestações elétricas**. Zürich: ABB, 2021.

CISCO SYSTEMS. **Industrial Ethernet switches for power substations**. San Jose: Cisco Systems, 2022. Disponível em: <https://www.ciscolive.com/c/dam/r/ciscolive/emea/docs/2023/pdf/PSOIoT-1201.pdf>

CUNHA, Antonio Paulo da. Bases conceituais da implantação de redes elétricas inteligentes. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-05082011-153327/publico/Tese_Antonio_Paulo_da_Cunha.pdf. Acesso em: 7 maio 2026.

FURUKAWA ELECTRIC LATAM. **Fundamentos de fibras ópticas**. Curitiba: Furukawa Electric Latam, 2023. Disponível em: <https://marketing.furukawalatam.com/emk/2020/ift/FCP-MF101-4.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

MATSUO, Igor Brandão Machado. **Sistema especialista para análise pós-evento em subestações utilizando IEC 61850**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-11072016-160355/publico/IgorBrandaoMachadoMatsuo2015.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

MIRANDA, Juliano Coêlho. **Segurança cibernética com IEC 61850 aplicada a subestações digitais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-11112016-090545/publico/Juliano.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

NETTO, Ulisses Chemin. **Aplicações distribuídas de controle e supervisão em subestações de energia elétrica utilizando relés digitais de proteção**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos,

2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-16042008-144037/publico/Ulisses.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

PETENEL, Fernando Henrique José. **Análise de comunicação em redes elétricas inteligentes**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-16102014-150851/publico/Diss_Fernando_H_J_Petenel.pdf. Acesso em: 7 maio 2026.

SANTOS, João Carlos dos. **Manutenção preditiva em enlaces ópticos industriais**. São Paulo: Atlas, 2022.

SIEMENS ENERGY. Optical communication systems for digital substations. Munique: Siemens Energy, 2023.

SILVA, Alberto Ferreira da. **Metodologia de auditoria de sistemas de automação de subestações baseadas na IEC 61850**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-25112021-125359/publico/AlbertoFerreiradaSilvaCorr21.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

SILVA, Robson Gomes da. **Metodologia de documentação do protocolo GOOSE em subestações IEC 61850**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-03022022-130817/publico/RobsonGomesdaSilvaCorr21.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

VICENTE, Décio Tomasulo de. **Aplicação dos padrões da norma IEC 61850 a sistemas de automação de subestações**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-09032012-151057/publico/Dissertacao_Decio_Tomasulo_De_Vicente.pdf. Acesso em: 7 maio 2026.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aterramento elétrico, 10-22

Armazenamento de energia, 76-85

Automação industrial, 53-75, 182-187

B

Baixa tensão, 10-22

Business Intelligence (BI), 23-30

C

Capacidade logística, 23-30

Concreto usinado, 97-107

Construção civil, 31-42, 97-107, 121-130, 151-160

Corrente crítica, 53-75

D

Descargas atmosféricas, 108-120

Disjuntores, 10-22

Dispositivos de proteção contra surtos (DPS), 10-22

Dispositivos diferenciais residuais (DR), 10-22

E

Eficiência operacional, 23-30, 53-75

Energia fotovoltaica, 76-85

Engenharia elétrica, 10-22, 76-85, 108-120, 188-203

Engenharia mecânica, 43-75, 86-96, 161-181

Engenharia civil, 31-42, 97-107, 121-130, 151-160

F

Fibras ópticas, 188-203

G

Gestão da manutenção, 43-75, 141-150, 182-187

Gestão da qualidade, 131-140

Gestão de resíduos, 31-42, 151-160

Granéis sólidos e líquidos, 23-30

I

Indústria 4.0, 53-75

Indústria 5.0, 182-187

Infiltrações em lajes, 121-130

Inovação organizacional, 131-140

Instalações elétricas, 10-22

L

Logística, 23-30

M

Manutenção industrial, 43-75, 141-150

Manutenção preditiva, 182-187

Manutenção produtiva total (TPM), 43-52, 66-75

Mineração, 76-85

P

PCM (Planejamento e Controle da Manutenção), 141-150

Power BI, 23-30

Processos de fabricação, 86-96

Produtividade industrial, 43-75, 141-150

Q

Qualidade, 131-140

R

Reaproveitamento de cavacos, 171-181

Reaproveitamento de resíduos, 31-42

Resíduos da construção civil, 151-160

S

Segurança elétrica, 10-22, 108-120

Sistemas híbridos de energia, 76-85

Subestações elétricas, 188-203

Sustentabilidade, 31-42, 151-160

T

Terminais logísticos, 23-30

TPM (Total Productive Maintenance), 43-52, 66-75

U

Usinagem, 86-96, 161-181

ORGANIZADORES

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Pós-Graduada em Gestão Educacional pela Faculdades Integradas Potencial - FIP - Cotias - SP; em Arte, Educação e Tecnologias Contemporâneas pela Universidade de Brasília - UnB e em Docência do Ensino Superior pela Universidade Candido Mendes RJ. Graduada em Desenho Industrial pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA. Graduada em Formação Pedagógica de Docentes para as áreas do Ensino Médio e Profissionalizante pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA. Exerço cargo de Professora na Faculdade Anhanguera São Luís - MA, ministrando disciplinas da área de Desenho Técnico em programas computacionais (AutoCAD, Inventor, REVIT). Atuo com apoio à Orientação de TCC. Atuei como Professora EaD pela UEMANET.

Ronaldo de Jesus Barros

Discente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão PPGCTM/IFMA (2026-2027). Docente do ensino superior na área de Engenharia na Faculdade Anhanguera de São Luís/MA (2022 atualmente). Bacharel em Engenharia Civil pela Faculdade Anhanguera de São Luís (2025) e bacharel em Engenharia Mecânica pela Faculdade Pitágoras de São Luís (2019). Possui especializações em Engenharia de Materiais e em Docência do Ensino Superior, ambas pela Universidade Norte do Paraná UNOPAR (2021). Possui formação técnica em Mecânica Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão IFMA (2012).

Lilian Barros Santiago

Graduada em Eletrônica Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA) (2004), em Administração pela Universidade Ceuma (2012) e em Formação Pedagógica pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) (2008). Possui especialização em Didática Universitária pela Faculdade Atenas Maranhense (FAMA) e formação em Coaching pelo Instituto Brasileiro de Coaching (IBC). Possui sólida experiência profissional na área de Proteção, Comando e Controle de Sistemas Elétricos, tendo atuado por 15 anos na Eletrobras Eletronorte. Na área educacional, desenvolve atividades de docência no ensino superior, técnico e básico, com ampla experiência em cursos presenciais e a distância. Atualmente é professora da Faculdade Pitágoras (Sistema Kroton), em São Luís (MA), atuando nos cursos das áreas de Engenharia Elétrica, Eletrônica, Administração e Recursos Humanos, ministrando disciplinas como Marketing, Rotinas de Pessoal, Ferramentas da Qualidade, Sistemas de Informação e Teoria Geral da Administração. Atuou como professora do Instituto Federal do Maranhão (IFMA), na modalidade de Educação a Distância, no Curso Técnico em Segurança do Trabalho, ministrando as disciplinas de Prevenção e Controle de Perdas e Legislação Portuária e Aquaviária. Também integrou o corpo docente do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI-MA), entre 2012 e 2015, nos cursos técnicos de Eletroeletrônica e Informática. Na rede pública estadual de ensino, possui experiência como professora de Ma-

temática no Ensino Fundamental e Médio, além de ter atuado por sete anos no Colégio Bacelar Portela, ministrando disciplinas nos cursos técnicos de Eletromecânica.

José Átila Matos Aroucha Júnior

Graduado em Engenharia Civil na Universidade Estadual do Maranhão - UEMA. Doutorando em Processos Construtivos e Saneamento Urbano na área de atuação em Estruturas, Construção Civil e Materiais. Mestre em Processos Construtivos e Saneamento Urbano na área de atuação em Estruturas, Construção Civil e materiais - Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará - UFPA. Especialista em Estruturas Metálicas - FATEC. Tenho experiência com Projetos em 3D - Revit; Trabalho com análise de licitação na área de Engenharia. Tenho experiência em Avaliação de Imóveis por inferência Estatística. Trabalho com consultoria em trabalhos acadêmicos com ênfase na área estrutural; Avaliação e Perícia e Gerenciamento de obras.

Thiago Santana de Oliveira

Bacharel em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal do Maranhão (2004), com mestrado em Engenharia de Materiais (2016), na mesma instituição. Atuou como profissional nas áreas de siderurgia e gerenciamento de frota de veículos e equipamentos a diesel, com bons conhecimentos nas ferramentas de gestão da manutenção e produção. Ministra aulas desde 2005, sendo a experiência inicial no ensino médio e técnico. Atualmente, trabalha no ensino superior, onde possui experiência de 10 anos, e técnico, ocupando os cargos de docente e coordenador de curso. Responsável pela organização de eventos na instituição e gestão de documentação dos cursos que coordeno. Possui importantes publicações na área.

Wellington Santos Araújo

Graduado em Licenciatura em Física pelo Instituto Federal do Maranhão (IFMA) em 2009, possui experiência na área da docência desde o mesmo ano, atuando nos ensinos Fundamental, Médio e Superior nas disciplinas de Física e Matemática. Especialista em Matemática e Estatística, é atualmente mestrando na área de Ensino de Física, desenvolvendo estudos voltados ao aprimoramento das práticas pedagógicas e do ensino das Ciências Exatas. Possui experiência acadêmica e profissional em conteúdos de Física Geral e Experimental, com ênfase em Mecânica, Energia, Eletromagnetismo, Gravitação, Ondulatória, Termodinâmica, Óptica e Física Moderna. Atua também em áreas relacionadas à Matemática Aplicada, incluindo Probabilidade e Estatística, Métodos Quantitativos, Cálculo Diferencial e Integral, Cálculo Vetorial e Lógica Matemática Computacional. Além da formação nas Ciências Exatas, possui conhecimentos em Empreendedorismo, Sistemas de Informação Gerencial e metodologias voltadas à formação profissional, contribuindo para uma atuação interdisciplinar no ensino e na pesquisa.



Diálogos Interdisciplinares em Engenharia – Volume 1 reúne estudos que exploram diferentes áreas da engenharia, abordando temas como instalações elétricas, logística, manutenção industrial, construção civil, energia, sustentabilidade, usinagem e inovação tecnológica. A obra promove a integração entre teoria e prática, oferecendo reflexões e contribuições voltadas ao desenvolvimento científico, tecnológico e à solução de desafios contemporâneos da engenharia.

ISBN 978-65-84364-42-4

